



Ana Catarina Geirinhas de Sousa

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

**Estudo de Aplicabilidade da Câmara
Climática de Duas-Pressões em
Calibrações de Instrumentos de
Medição de Humidade Relativa**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Prof^a. Doutora Helena Víctorovna Guitiss
Navas,
Prof^a. Auxiliar, FCT/UNL-DEMI

Coorientadora: Engenheira Isabel Maria Melo Lopes Dias
Lóio,
Instituto Português da Qualidade

Coorientador: Doutor João Luís Vieira Alves e Sousa,
Instituto Português da Qualidade



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2018

Estudo de Aplicabilidade da Câmara Climática de Duas-Pressões em Calibrações de Instrumentos de Medição de Humidade Relativa

COPYRIGHT © Ana Catarina Geirinhas de Sousa, Faculdade Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Este trabalho representa o final de uma das etapas mais importantes da minha vida, que testou as minhas capacidades, pôs à prova a minha perseverança e desafiou os meus limites por diversas vezes. Felizmente, pude contar com o apoio de pessoas incríveis que estiveram sempre do meu lado com uma palavra, um abraço, um gesto, transformando o impossível em possível.

Este percurso mostrou-me que o sucesso não se expressa no singular, mas sim no plural e por isso quero deixar aqui o meu mais sincero agradecimento a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta etapa.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais, por tudo. Por todo o apoio, paciência, por nunca terem duvidado das minhas capacidades, por acreditarem sempre em mim, por fazerem o impossível para aliviarem a minha carga. Sem eles, nunca teria sido capaz.

Quero agradecer aos meus avós, por torcerem sempre por mim e pelo orgulho que vejo espelhado nos seus olhos.

Aos meus tios e primos, que sempre vestiram a minha camisola, muito obrigada por todo o incentivo.

Ao Nuno, pela paciência, por todo o amor, carinho, apoio incondicional. Muito obrigada por todas as revisões, pelas horas perdidas, por toda a força nos piores momentos.

À Raquel, que viveu esta última etapa ao meu lado, muito obrigada pelo apoio, pelos conselhos, pela ajuda, pela amizade, pelos desabafos.

A todos os amigos que a faculdade me trouxe, quero agradecer a paciência, o apoio, os bons momentos, as memórias.

Aos amigos de sempre, presentes e ausentes, o meu obrigada.

À minha orientadora, Professora Helena Navas, quero agradecer todo o apoio, disponibilidade e sugestões que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

À minha co-orientadora, Engenheira Isabel Lóio, o meu mais sincero obrigada por todo o apoio, conhecimento transmitido. Obrigada por me ter recebido de braços abertos, por toda a disponibilidade e pelo carinho com que sempre me tratou.

Ao meu co-orientador Doutor João Alves e Sousa, quero agradecer toda a ajuda, sugestões, revisões e conhecimento transmitido.

Ao Doutor Olivier Pellegrino, o meu sincero agradecimento por todos os esclarecimentos a nível de terminologia e pelo crucial apoio no cálculo das derivadas parciais.

Quero agradecer ao IPQ por me ter proporcionado esta oportunidade, providenciando todas as condições necessárias à realização deste trabalho.

Por último, um agradecimento especial à FCT/UNL, e em particular, a todos os professores que fizeram parte deste percurso, pela excelente formação que me proporcionaram.

Resumo

Numa sociedade inovadora e tecnologicamente desenvolvida que vise o sucesso económico, a metrologia assume um papel decisivo ao proporcionar uma infraestrutura tecnológica que permite assegurar a qualidade de bens e serviços.

Cabe ao Instituto Português da Qualidade, como Organismo Nacional de Metrologia, garantir o máximo rigor nas medições, definindo prioridades que sustentem quaisquer desenvolvimentos da ciência da medição.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito de um estágio curricular que teve lugar no Laboratório de Temperatura do Laboratório Nacional de Metrologia.

O domínio de higrometria do Laboratório de Temperatura tem como principal missão, assegurar a rastreabilidade metrológica da grandeza humidade, através da calibração de instrumentos de medição de humidade. Para isso, este domínio serve-se de uma câmara climática, instrumento gerador de humidade, e de um higrómetro de ponto de orvalho, instrumento padrão, para realizar calibrações de higrómetros.

A calibração do instrumento padrão é realizada externamente, num NMI, o que implica que a atividade do domínio seja suspensa, por um período não inferior a um mês.

Com este trabalho pretende-se estudar a aplicabilidade da câmara climática de duas pressões para funcionar como padrão, permitindo ao domínio de higrometria manter a sua normal atividade em períodos em que o atual padrão se encontra em calibração.

Assim, realizaram-se diversos estudos com o objetivo de caracterizar o comportamento do equipamento em humidade e temperatura.

Para se obter o valor de incerteza da câmara para os diversos patamares de humidade relativa, procedeu-se à calibração da mesma, através da calibração dos seus sensores de pressão e de temperatura.

Surgiu, ainda, a necessidade de avaliar o comportamento do volume útil da câmara em temperatura e humidade relativa, realizando-se, para isso, estudos de uniformidade e estabilidade para as duas grandezas.

A compilação dos resultados de todos os estudos, assim como o cálculo das incertezas associadas, permitiu caracterizar o comportamento deste equipamento como um instrumento de medição com qualidade metrológica para ser utilizado como padrão.

Palavras-chave:

Metrologia, Câmara Climática, Padrão de Medição, Calibração

Abstract

In an innovative and technologically developed society that seeks economic success, metrology plays a decisive role in providing a technological infrastructure that ensures the quality of goods and services.

It is up to the Portuguese Institute for Quality as a National Organization of Metrology ensures maximum accuracy in measurements setting priorities to support any developments in measurement science.

This work was developed under a curricular internship that took place in the Laboratory of Temperature of the National Metrology Laboratory.

The main objective of the Temperature Laboratory's hygrometry domain is to ensure the metrological traceability of the humidity quantity, through the calibration of relative humidity instruments. Therefore, this domain uses a climatic chamber as a humidity generator and a dew-point hygrometer as a measurement standard to perform hygrometer calibrations.

Standard instrument calibration is performed externally in an NMI, requiring the domain activity to be suspended for a period not less than a month.

This work intends to study the applicability of the two-pressure generator to function as a measurement standard allowing the domain of hygrometry to maintain its normal activity in periods in which the current standard is out to calibrate.

Therefore, several studies were carried out to characterize the behavior of the equipment in humidity and temperature.

To obtain the chamber's uncertainty value for the different relative humidity levels, the calibration was carried out by calibrating its pressure and temperature sensors.

It was also necessary to evaluate the behavior of the usable volume of the chamber in temperature and relative humidity and for this purpose studies of uniformity and stability were performed for both quantities.

The compilation of the results of all the studies as well as the calculation of the uncertainties allowed characterizing the behavior of this equipment as a measuring instrument with metrological quality to be used as a standard.

Keywords:

Metrology, Climatic Chamber, Measurement Standard, Calibration

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e Objetivos do Estudo.....	1
1.2. Metodologia do Estudo	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. Introdução à Metrologia.....	5
2.1. Evolução Histórica e Conceito de Metrologia.....	5
2.2. Instituto Português da Qualidade	6
2.2.1. Laboratório de Temperatura do LNM	7
2.3. Calibração	8
2.4. Rastreabilidade Metrológica	9
2.4.1. <i>Bureau International des Poids et Mesures</i>	9
2.5. Sistema Internacional de Unidades	10
2.5.1. Unidade de Base da Grandeza Temperatura-kelvin	11
2.6. Princípios de Avaliação da Incerteza de Medição.....	11
2.6.1. Conceito de Erro e Incerteza de Medição	12
2.6.2. Avaliação das Estimativas das Grandezas de Entrada	14
2.6.3. Avaliação das Estimativas das Grandezas de Saída	17
2.6.4. Incerteza de Medição Expandida	18
3. Medição de Humidade	21
3.1. Conceitos Fundamentais no Âmbito da Higrimetria	21
3.2. Métodos de Medição de Humidade.....	23
3.2.1. Princípios de Funcionamento de Higrómetros	23
3.3. Influência da Temperatura e Pressão na Medição de Humidade Relativa.....	24
3.4. Métodos de Geração de Humidade	25
4. Caracterização dos Procedimentos de Medição de Humidade	27
4.1. Equipamentos	27
4.1.1. Higrómetro de Temperatura de Ponto de Orvalho	27

4.1.2.	Câmara Climática de Duas-Pressões	29
4.2.	Calibração de Instrumentos de Humidade Relativa	35
4.2.1.	Descrição do Método	36
4.2.2.	Tratamento de Dados	37
5.	Estudo de Aplicabilidade da Câmara Climática de Duas-Pressões.....	43
5.1.	Calibração da Câmara Climática de Duas-Pressões.....	43
5.1.1.	Calibração dos Sensores de Temperatura.....	43
5.1.2.	Calibração dos Sensores de Pressão.....	50
5.1.3.	Cálculo da Incerteza da Câmara Climática de Duas-Pressões	51
5.2.	Estudo de Uniformidade e Estabilidade de Temperatura	56
5.2.1.	Calibração dos Termómetros de Resistência de Platina de 100 Ω	57
5.2.2.	Metodologia	61
5.3.	Estudo de Uniformidade e Estabilidade de Humidade	64
5.4.	Validação da Calibração do Higrómetro	66
6.	Análise de Resultados.....	69
6.1.	Resultados da Calibração da Câmara Climática	69
6.1.1.	Sensores de Temperatura da Câmara Climática.....	69
6.1.2.	Sensores de Pressão.....	70
6.1.3.	Incerteza da Câmara Climática.....	71
6.2.	Estudo de Estabilidade e Uniformidade de Temperatura	72
6.3.	Estudo de Estabilidade e Uniformidade de Humidade	78
6.4.	Resultados da Calibração de Instrumentos de Humidade Relativa	83
7.	Conclusões.....	87
	Bibliografia	91
	Anexos	93
	Anexo I - Certificado de Calibração do Higrómetro de Ponto de Orvalho	95
	Anexo II - Certificado de Calibração do Higrómetro	98
	Anexo III - Exemplo Folha de Cálculo Calibração RTD3.....	102
	Anexo IV - Exemplo Folha de Balanço de Incerteza RTD3- Ensaio $t = 0^{\circ}\text{C}$.....	103

Anexo V - Certificado de Calibração RTD3	104
Anexo VI- Exemplo Balanço de Incerteza da Câmara	106
Anexo VII - Exemplo Folha de Cálculo PRT-100	107
Anexo VIII - Exemplo Cálculo Constantes PRT-100.....	108
Anexo IX - Exemplo Certificado de Calibração PRT-100.....	109
Anexo X - Exemplo Tratamento de Dados: Estudo Humidade	111
Anexo XI - Exemplo Tratamento de Dados: Estudo Temperatura.....	112
Anexo XII - Código Octave	113

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Estrutura organizacional do DMET.....	7
Figura 2.2 - Cadeia de rastreabilidade metrológica.....	9
Figura 2.3 - Distribuição normal	16
Figura 2.4 - Distribuição retangular	16
Figura 2.5 - Distribuição triangular.....	17
Figura 3.1 - Variação da pressão de vapor saturante com a temperatura	24
Figura 4.1 - Higrómetro de ponto de orvalho MBW-373H	27
Figura 4.2 - Esquema de funcionamento do higrómetro de ponto de orvalho	28
Figura 4.3 - Câmara climática de duas-pressões	29
Figura 4.4 - Esquema simplificado do método de duas-pressões.....	30
Figura 4.5 - Esquema de funcionamento câmara climática de duas-pressões.....	30
Figura 4.6 - Parâmetros fornecidos pelo <i>software ControLogTM</i>	35
Figura 4.7 - <i>Layout</i> inicial do painel de controlo da câmara climática de duas-pressões	37
Figura 5.1 - PT-25 padrão	44
Figura 5.2 - Ponte de Resistência F-17	44
Figura 5.3 - Banho de água termorregulado.....	45
Figura 5.4 - Ponto de gelo	45
Figura 5.5 - Fluido de transferência	46
Figura 5.6 - Remoção dos sensores de temperatura	46
Figura 5.7 - Painel de controlo	47
Figura 5.8 - Equipamento padrão de pressão	50
Figura 5.9 - Remoção dos transdutores de pressão	50
Figura 5.10 - Montagem experimental.....	51
Figura 5.11- Termómetros de resistência de platina	57
Figura 5.12 - Ponte de resistências F-250RH.....	58
Figura 5.13 - Calibração PRT-100	59
Figura 5.14 - Volume estudado no interior da câmara	62
Figura 5.15 - Primeira montagem dos sensores	62
Figura 5.16 - Segunda montagem dos sensores	63
Figura 5.17 - Esquema exemplificativo do volume de trabalho da câmara	65
Figura 5.18 - Montagem experimental.....	65
Figura 6.1 - Oscilação térmica no interior na câmara, 1º estudo, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	72
Figura 6.2 - Oscilação térmica no interior na câmara, 2º estudo, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	72
Figura 6.3 - Oscilação térmica no interior na câmara, 1º estudo, $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	73

Figura 6.4 - Oscilação térmica no interior na câmara, 2º estudo, $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	73
Figura 6.5 - Oscilação térmica no interior na câmara, 1º estudo, $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	74
Figura 6.6 - Oscilação térmica no interior na câmara, 2º estudo, $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	74
Figura 6.7 - Oscilação térmica no interior na câmara, 1º estudo, $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	74
Figura 6.8 - Oscilação térmica no interior na câmara, 2º estudo, $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	75
Figura 6.9 - Média e respetiva incerteza para o ensaio $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	76
Figura 6.10 - Média e respetiva incerteza para o ensaio $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	77
Figura 6.11 - Média e respetiva incerteza para o ensaio $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	77
Figura 6.12 - Média e respetiva incerteza para o ensaio $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	77
Figura 6.13 - Medições de humidade no interior da câmara, 1º ensaio, $HR = 30\%$	79
Figura 6.14 - Medições de humidade no interior da câmara, 2º ensaio, $HR = 30\%$	79
Figura 6.15 - Medições de humidade no interior da câmara, 1º ensaio, $HR = 50\%$	80
Figura 6.16 - Medições de humidade no interior da câmara, 2º ensaio, $HR = 50\%$	80
Figura 6.17 - Medições de humidade no interior da câmara, 1º ensaio, $HR = 70\%$	80
Figura 6.18 - Medições de humidade no interior da câmara, 2º ensaio, $HR = 70\%$	81
Figura 6.19 - Média e incerteza, $HR = 30\%$	81
Figura 6.20 - Média e incerteza, $HR = 50\%$	82
Figura 6.21 - Média e incerteza, $HR = 70\%$	82

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Grandezas base e unidades base SI	10
Tabela 2.2 - Fatores de expansão versus número de graus de liberdade efetivos	19
Tabela 4.1 - Especificações técnicas do higrômetro de ponto de orvalho.....	28
Tabela 4.2 - Especificações técnicas da câmara climática	33
Tabela 4.3 - Valores de calibração	35
Tabela 4.4 - Exemplo de amostra de dados adquiridos pelo sistema para 15 °C, 50 %.....	37
Tabela 4.5 - Resultados higrômetro de ponto de orvalho (15 °C, 50 %)	39
Tabela 4.6 - Ensaio $t = 15\text{ °C}$ e $HR = 50\%$: resultados	39
Tabela 4.7 - Balanço de incerteza para a grandeza temperatura	40
Tabela 4.8 - Balanço de incerteza para a grandeza humidade.....	41
Tabela 5.1 - Contribuições de incerteza dos sensores de temperatura	48
Tabela 5.2 - Fontes de incerteza para temperatura de saturação	52
Tabela 5.3 - Fontes de incerteza para a pressão de saturação	52
Tabela 5.4 - Fontes de incerteza para a temperatura da câmara.....	52
Tabela 5.5 - Fontes de incerteza para a pressão da câmara	53
Tabela 5.6 - Coeficientes de sensibilidade obtidos pelo método das variáveis complexas	55
Tabela 5.7 - Coeficientes de sensibilidade obtidos pelas expressões das derivadas parciais	55
Tabela 5.8 - Valores de incerteza expandida pelo GUM e pelo Método de Monte Carlo	56
Tabela 5.9 - Médias e erro da câmara	56
Tabela 5.10 - Contribuições para a incerteza dos PRT's -100	59
Tabela 5.11 - Exemplo de cálculo de R_0	60
Tabela 5.12 - Fontes de incerteza consideradas para o estudo de temperatura	64
Tabela 5.13 - Identificação e localização dos higrômetros	65
Tabela 5.14 - Fontes de incerteza consideradas para o estudo de humidade relativa.....	66
Tabela 5.15 - Fontes de incerteza consideradas na calibração do termohigrômetro	67
Tabela 6.1 - Análise da incerteza de medição para sensor RTD0, ensaio $t = 0\text{ °C}$	69
Tabela 6.2 - Valores de incerteza para os sensores RTD0 e RTD3	70
Tabela 6.3 - Coeficientes de correção de temperatura da câmara climática de duas-pressões....	70
Tabela 6.4 - Resultados da calibração dos transdutores T2 e T3	70
Tabela 6.5 - Valores dos coeficientes de correção obtidos pela câmara para T2 e T3.....	71
Tabela 6.6 - Incerteza expandida da câmara climática para diferentes patamares de HR	71
Tabela 6.7 - Incerteza expandida para diferentes patamares de HR , 2º balanço	71
Tabela 6.8 - Valores médios de temperatura por ponto	72
Tabela 6.9 - Resultados da avaliação da uniformidade térmica da câmara.....	75

Tabela 6.10 - Resultados da avaliação da estabilidade térmica da câmara	75
Tabela 6.11 - Valores de incerteza por ponto e patamar	76
Tabela 6.12 - Valores médios e incerteza expandida para a câmara	78
Tabela 6.13 - Valores médios de humidade relativa para os dois ensaios	78
Tabela 6.14 - Resultados da avaliação da estabilidade da câmara	81
Tabela 6.15 - Resultados da avaliação da uniformidade da câmara.....	81
Tabela 6.16 - Incerteza expandida.....	83
Tabela 6.17 - Resultados MBW - 373H, ensaio $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 30\%$	83
Tabela 6.18 - Resultados Câmara Climática, ensaio $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 30\%$	83
Tabela 6.19 - Resultados MBW - 373H, ensaio $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 50\%$	84
Tabela 6.20 - Resultados Câmara Climática, ensaio $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 50\%$	84
Tabela 6.21 - Resultados MBW-373-H, ensaio $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 75\%$	85
Tabela 6.22 - Resultados Câmara Climática, ensaio $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 75\%$	85

Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
EIT-90	Escala Internacional de Temperatura de 1990
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
GUM	<i>Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
IPQ	Instituto Português da Qualidade
LNLM	Laboratório Nacional de Metrologia
LTE	Laboratório de Temperatura
NIST	<i>National Institute of Standards and Technologies</i>
NMI	Instituto Nacional de Metrologia
PRT	Termómetro de Resistência de Platina
SI	Sistema Internacional de Unidades
SPQ	Sistema Português da Qualidade

Simbologia

a	Valor de incerteza	
C_i	Coefficiente de sensibilidade	
e_w	Graus efetivos de saturação	
f_w	Fator de melhoramento	
HR	Humidade relativa	%
k	Fator de expansão	
m_a	Massa de ar seco	kg
m_v	Massa de vapor de água	kg
n	Número de observações	
p	Pressão parcial	Pa
P_c	Pressão da câmara	Pa
p_s	Pressão de vapor saturante	Pa
P_s	Pressão de saturação	Pa
P_t	Pressão total	Pa
q	Valor medido	
\bar{q}	Valor médio	
r	Razão de mistura	
R_0	Resistência à temperatura de 0 °C	Ω
R_t	Resistência à temperatura t	$\Omega/^\circ\text{C}$
s	Desvio-padrão	
s^2	Variância experimental	
t	Temperatura	$^\circ\text{C}$
T	Temperatura termodinâmica	K
T_0	Temperatura termodinâmica do ponto de congelação da água	K
T_c	Temperatura da câmara	$^\circ\text{C}$
T_{po}	Temperatura de ponto de orvalho	$^\circ\text{C}$
t_{ref}	Temperatura de referência	$^\circ\text{C}$

T_s	Temperatura de saturação	°C
T_{sx}	Temperatura do sensor x	°C
U	Incerteza de medição expandida	
$u(x)$	Incerteza-padrão	
U_{cali}	Incerteza expandida presente no certificado de calibração	
ν_{ef}	Graus de liberdade efetivos	
V_M	Valor medido	
V_{Ref}	Valor referência	
X	Grandeza de entrada	
x_c	Contagem A/D	
Y	Grandeza de saída	
ΔT	Variação de temperatura	°C
ΔT_{Ess}	Estabilidade térmica do sensor x	°C
ΔT_U	Uniformidade térmica da câmara	°C
Δx	Incremento em x	
ε	Erro de medição	
$\frac{\partial HR}{\partial P_c}$	Derivada parcial de HR em relação a P_c	%/Pa
$\frac{\partial HR}{\partial P_s}$	Derivada parcial de HR em relação a P_s	%/Pa
$\frac{\partial HR}{\partial T_c}$	Derivada parcial de HR em relação a T_c	%/°C
$\frac{\partial HR}{\partial T_s}$	Derivada parcial de HR em relação a T_s	%/°C

1. Introdução

O capítulo que se inicia contém o enquadramento e os objetivos deste estudo, assim como a metodologia desenvolvida neste contexto. A estrutura concebida para este documento encontra-se, também, descrita neste capítulo.

1.1. Enquadramento e Objetivos do Estudo

Com a constante procura pela excelência de bens e serviços, por parte da sociedade atual, tornou-se imperativo o desenvolvimento de ferramentas metrológicas aliadas à investigação científica que permitem suprir as necessidades impostas. A metrologia como “ciência da medição” desempenha um papel singular, assegurando a qualidade e harmonização de bens e serviços ao proporcionar uma infraestrutura tecnológica de carácter universal que se encontra em constante desenvolvimento [1].

Cabe ao Instituto Português da Qualidade coordenar e gerir o Sistema Português da Qualidade que engloba, entre outros, o domínio da metrologia [1].

É neste contexto que se insere o estudo desenvolvido, no âmbito de um estágio curricular realizado no Instituto Português da Qualidade (IPQ), resultado de um acordo celebrado entre este organismo e a FCT/UNL.

Este trabalho insere-se no Laboratório Nacional de Temperatura, mais concretamente no domínio da higrometria. Este domínio é responsável pela calibração de higrómetros, instrumentos capazes de medir as grandezas humidade e temperatura.

Setores como o farmacêutico, alimentar, agrícola, entre outros, necessitam de cumprir limites estabelecidos no que toca a medições de humidade e temperatura de forma a garantir a qualidade dos seus produtos. A conservação de medicamentos, o crescimento de determinadas plantas e até mesmo a preservação do acervo de um museu são exemplos da importância de determinar de forma rigorosa estas grandezas, através de instrumentos calibrados de forma a assegurar a qualidade pretendida.

Em Portugal, compete ao domínio de higrometria estabelecer e assegurar a cadeia de rastreabilidade das grandezas medidas servindo-se, para isso, de equipamento de elevada exatidão com rastreabilidade metrológica a padrões primários. De modo a manter a exatidão do equipamento padrão, este necessita de ser calibrado regularmente no exterior, por um padrão primário, permanecendo ausente por um período não inferior a um mês. Durante este período o domínio de higrometria mantém-se condicionado, impossibilitado de dar resposta a pedidos de calibração por parte de clientes externos e/ou internos.

Este estudo pretende transpor esta questão, ao estudar a aplicabilidade da câmara climática de duas-pressões, equipamento utilizado como meio termorregulado em calibrações de

termohigrômetros, para funcionar como padrão de humidade, possibilitando ao domínio manter a sua normal atividade.

Para alcançar esta finalidade, realizaram-se diversos estudos de forma a avaliar as capacidades do equipamento em cumprir o objetivo proposto.

1.2. Metodologia do Estudo

Com o intuito de cumprir os objetivos descritos, foi desenvolvida a seguinte metodologia, estruturada em diversas etapas.

Como primeira abordagem ao tema foi realizada a pesquisa e estudo de bibliografia dedicada à metrologia e, especificamente, ao contexto da área da temperatura e humidade. Neste âmbito efetuou-se a revisão e atualização do procedimento de utilização da câmara climática de duas pressões.

Numa segunda fase, efetuou-se a análise dos equipamentos disponíveis no laboratório de temperatura, nomeadamente, o higrómetro de temperatura de ponto de orvalho e a câmara climática de duas pressões. Como complemento, realizou-se a calibração de um higrómetro, seguindo o procedimento em vigor no laboratório de temperatura, com determinação das respetivas incertezas combinadas para futura comparação.

Após esta análise, e com o propósito de avaliar as capacidades da câmara em funcionar como padrão, realizou-se a calibração da mesma através da calibração dos seus sensores de pressão e temperatura. Nesta fase, o objetivo inclui o cálculo das incertezas associadas à câmara climática. Devido à complexidade do modelo matemático em que se baseia o equipamento, foi necessário desenvolver, em Octave, um programa, que permitiu calcular os coeficientes de sensibilidade para os vários parâmetros. Paralelamente, como forma de validação dos dados adquiridos pelo *software* do equipamento, foi desenvolvido um programa na mesma linguagem, que permite obter valores de humidade relativa de acordo com o mesmo modelo matemático.

Como forma de caracterizar o comportamento da temperatura e humidade relativa no volume útil da câmara, numa quarta fase, efetuaram-se dois estudos de estabilidade e uniformidade para as grandezas referidas.

Por último, após a compilação dos resultados de todos os estudos, realizou-se nova calibração ao mesmo equipamento, recorrendo à câmara climática como padrão.

Os resultados desta última etapa possibilitam uma comparação indireta entre o equipamento em estudo e o higrómetro de temperatura de ponto de orvalho.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos:

O primeiro capítulo, designado por “*Introdução*”, apresenta os objetivos deste estudo bem como o contexto em que este se insere.

O segundo capítulo, intitulado por “*Introdução à Metrologia*”, aborda o conceito de metrologia assim como algumas noções no âmbito metrológico, nomeadamente os princípios da avaliação de incerteza de medição. Neste capítulo apresenta-se o Instituto Português da Qualidade, o Laboratório Nacional de Metrologia e o Laboratório de Temperatura onde teve lugar este estudo. Descreve-se ainda, o Sistema Internacional de Unidades, com especial foco na unidade base de temperatura termodinâmica - kelvin.

O terceiro capítulo, denominado por “*Medição de Humidade*”, dá a conhecer os fundamentos teóricos associados à medição desta grandeza, que constituem os pilares dos estudos realizados.

O quarto capítulo, intitulado por “*Caracterização dos Procedimentos de Medição de Humidade*”, descreve os equipamentos de geração de humidade do laboratório de temperatura, assim como o procedimento adotado por este, para calibrações de instrumentos de humidade relativa. Neste capítulo, retrata-se a calibração de um termohigrómetro recorrendo ao procedimento analisado.

O quinto capítulo, designado por “*Estudos de Aplicabilidade da Câmara Climática de Duas-Pressões*”, é composto por vários subcapítulos, onde se caracterizam os estudos realizados à câmara climática no contexto dos objetivos deste trabalho. É descrita a calibração da câmara climática, o estudo de uniformidade e estabilidade de temperatura e humidade do volume útil da câmara e ainda a reprodução da calibração retratada no capítulo anterior utilizando a câmara como padrão.

No sexto capítulo, designado por “*Análise de Resultados*”, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos fruto dos estudos realizados.

Por fim, o sétimo capítulo, denominado de “*Conclusões*”, contém as conclusões referentes aos trabalhos desenvolvidos no âmbito deste estudo e possível trabalho futuro.

2. Introdução à Metrologia

Cada vez mais, a busca pelo sucesso numa sociedade que procura a inovação tecnológica, tem levado empresas a adotar a metrologia como ferramenta de gestão da qualidade dos seus produtos e serviços. A ciência de medição é transversal a todas as áreas, não sendo exclusiva do mundo científico, estando por trás do sucesso económico, da fiabilidade de sistemas de navegação, do correto diagnóstico de doenças e, em geral, na confiabilidade de serviços por parte dos cidadãos.

Neste capítulo, é abordada esta ciência, apresentando-se uma retrospectiva de como a metrologia evoluiu até ao conceito que hoje a define. Seguindo a mesma linha de pensamento, introduzem-se alguns conceitos referentes a este domínio e, apresenta-se o Instituto Português da Qualidade, organismo nacional responsável pela gestão do Sistema Português da Qualidade.

2.1. Evolução Histórica e Conceito de Metrologia

A preocupação em estabelecer regras, padrões de conversão ou uniformização de unidades remonta aos primórdios da humanidade. O ser humano desde sempre que recorre a instrumentos, na altura rudimentares: uma vara, uma pedra ou o próprio palmo como referência, para comparar com outras dimensões, surgindo, assim, a necessidade da criação de um sistema de unidades [2].

Já em 3000 A.C, no antigo Egito, os arquitetos reais responsáveis pela construção dos templos e pirâmides utilizavam um padrão de medida intitulado de “cúbito real” que obedecia a uma verificação a cada lua cheia. O “cúbito real” era definido pelo comprimento do antebraço do Faraó que se encontrava no poder, medindo desde o cotovelo até à ponta do dedo médio mais a largura da sua mão [2].

Com o avançar dos tempos, foi-se tornando imperativo definir unidades e estabelecer padrões, de modo a comparar instrumentos de medição com os últimos [2].

Em Portugal, na idade média, a medida padrão mais utilizada para definir o comprimento era o palmo, que correspondia em média a 22 cm, sendo que para medir outras grandezas eram utilizados outros padrões cujo valor divergia de região para região.

Foi durante o reinado de D. João VI que Portugal adotou o sistema métrico decimal, criado pela Academia de Ciências de França, que tem como base o “*mètre*”, medida equivalente à décima milionésima parte do quarto de meridiano terrestre, porém com designação portuguesa [3].

Em 1852, pela mão de D. Maria II, foi criada uma lei que visava a regulamentação dos sistemas de medição de todo o país, segundo o sistema métrico decimal já com a denominação de metro [3].

A convenção do metro foi assinada em 1875 por 17 países, incluindo Portugal [4].

Mais tarde, em 1960, o Sistema Métrico Decimal passou a designar-se Sistema Internacional de Unidades (SI) que corresponde ao sistema utilizado nos dias de hoje [3].

Atualmente, a metrologia é definida como a “ciência da medição e suas aplicações” e abrange todos os aspetos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição sendo transversal às mais diversas áreas científicas e tecnológicas [5].

Recorrendo à calibração de instrumentos de medição, a metrologia procura garantir a qualidade dos resultados face aos requisitos exigidos (*fit-for-purpose*).

A metrologia encontra-se segmentada em três domínios [6]:

1. Metrologia científica, que tem a seu cargo a organização e desenvolvimento de padrões de medição e respetiva manutenção;
2. Metrologia industrial, responsável por garantir o funcionamento adequado dos instrumentos de medição utilizados na indústria assim como nos processos de produção e ensaio;
3. Metrologia legal, que foi criada como resposta à necessidade de assegurar a fiabilidade de transações comerciais do ponto de vista metrológico. Fica a seu cargo a proteção dos cidadãos das consequências de medições incorretas sendo para isso legisladas exigências referentes a instrumentos de medição e ensaio.

2.2. Instituto Português da Qualidade

O Instituto Português da Qualidade (IPQ) é um instituto público que tem como objetivo assegurar a "procura da qualidade de produtos e serviços para o aumento da qualidade de vida dos cidadãos, aumento da competitividade das atividades económicas num contexto de progressiva liberdade de circulação de bens" [1].

Este organismo é responsável por gerir e desenvolver o Sistema Português da Qualidade (SPQ) e outros sistemas de qualificação regulamentar que lhe forem atribuídos por lei. O IPQ tem a seu cargo a promoção e coordenação de atividades que visem contribuir para demonstrar a credibilidade da ação dos agentes económicos, como também, o desenvolvimento das atividades necessárias à sua função como Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) [7].

Ao IPQ, na perspetiva de Organismo Nacional de Normalização compete:

- A promoção e a elaboração de normas portuguesas, assegurando a coerência e atualidade do acervo normativo nacional;
- A divulgação e ajustamento de legislação nacional sobre produtos às normas da União Europeia.

Enquanto Instituição Nacional de Metrologia, subsistema do SPQ, tem como missão [1]:

- Garantir o rigor e a exatidão das medições realizadas, assegurando a sua comparabilidade e rastreabilidade, a nível nacional e internacional;
- A realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões das unidades de medida.

2.2.1. Laboratório de Temperatura do LNM

O Laboratório Nacional de Metrologia (figura 2.1), Instituição Nacional de Metrologia, insere-se no Departamento de Metrologia que inclui, ainda, a Unidade de Metrologia Legal.



Figura 2.1 - Estrutura organizacional do DMET [1]

Está atribuída à Unidade de Metrologia Legal a aprovação e execução de modelos de operações de verificação metrológica de instrumentos de medição empregues em transações comerciais e nos âmbitos da segurança, saúde e ambiente.

O LNM, enquanto Instituição Nacional de Metrologia, está incumbido de [1]:

- Representar o IPQ nos órgãos de coordenação técnica das organizações europeias e internacionais de metrologia;
- Promover a dinamização do subsistema de metrologia, realizar e manter os padrões nacionais das unidades de medida;
- Organizar e participar em comparações europeias e internacionais de padrões e instrumentos de medição, assim como promover e participar como laboratório de referência em programas de comparações nacionais;
- Calibrar padrões de referência e instrumentos de medição dos laboratórios acreditados e de outras entidades;

- E realizar ensaios de controlo metrológico de instrumentos de medição, produzir e certificar materiais de referência.

O Laboratório de Temperatura está inserido no LNM e é responsável pelo desenvolvimento dos padrões nacionais de temperatura e humidade relativa, tendo a seu cargo as seguintes tarefas [1]:

- Realizar a Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) nos pontos fixos entre o ponto triplo do argon ($-189,3442\text{ }^{\circ}\text{C}$) e o ponto de congelação da prata ($961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- Assegurar a rastreabilidade das medições da grandeza temperatura no intervalo de medição de $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ e da grandeza humidade relativa no intervalo de medição de 10 % a 90 %;
- Calibrar os padrões de referência dos laboratórios secundários, acreditados e da indústria;
- Coordenar e participar em comparações interlaboratoriais nacionais e internacionais;
- Apoiar tecnicamente a metrologia legal.

2.3. Calibração

Define-se calibração como sendo a operação que estabelece, sob condições especificadas, num primeiro passo, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; num segundo passo, utiliza esta informação para estabelecer uma relação, visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação [5].

A calibração constitui uma ferramenta básica para assegurar a rastreabilidade de uma medição, e é conseguida através de comparação direta com padrões.

Designa-se por padrão de medição qualquer artefacto, instrumento de medição ou material de referência, destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou mais valores de uma grandeza para servir de referência [5].

A calibração de instrumentos de medição permite:

- Determinar a exatidão das leituras do instrumento;
- Estabelecer a fiabilidade do instrumento;
- Assegurar a consistência das leituras de um instrumento em relação a outras medições;
- Obter outras propriedades metrológicas tais como o efeito de grandezas de influência.

O resultado de uma calibração encontra-se documentado no chamado certificado de calibração.

2.4. Rastreabilidade Metrológica

À propriedade que relaciona um resultado de medição a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, contabilizando a contribuição de cada uma para a incerteza de medição dá-se o nome de rastreabilidade [5].

Esta propriedade é de extrema importância no âmbito da metrologia, uma vez que permite harmonizar medições em qualquer momento e em qualquer parte do mundo.

A figura 2.2, referente à cadeia de rastreabilidade metrológica, evidencia as relações hierárquicas que são estabelecidas de acordo com a incerteza conseguida em cada patamar da pirâmide.

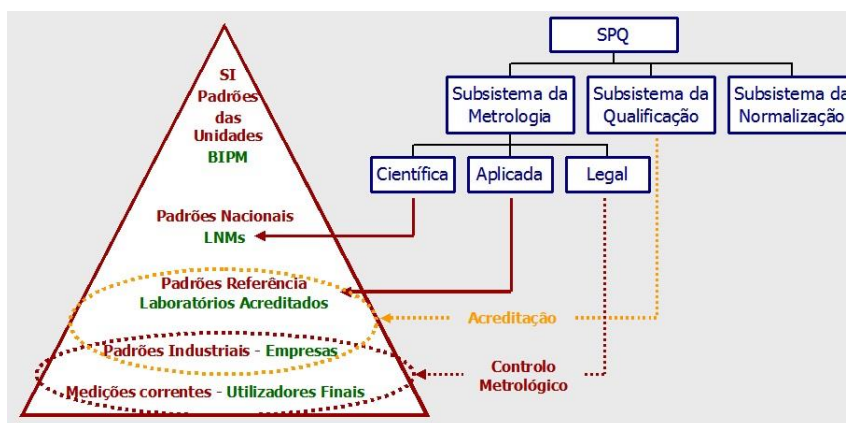


Figura 2.2 - Cadeia de rastreabilidade metrológica [8]

Analisando a pirâmide verifica-se que o seu topo é ocupado pelas definições fundamentais das grandezas base SI, *Bureau* Internacional de Pesos e Medidas (BIPM). No nível abaixo, encontram-se os padrões nacionais a cargo do Laboratório Nacional de Metrologia, utilizados para calibração dos padrões de referência dos laboratórios acreditados que preenchem o patamar seguinte. O último nível agrega os padrões industriais utilizados pelas empresas no âmbito da certificação. Por último, encontram-se os utilizadores finais que englobam as medições correntes.

As incertezas de medição aumentam no sentido decrescente da pirâmide.

2.4.1. *Bureau International des Poids et Mesures*

A BIPM é uma organização internacional que ficou estabelecida na “Convenção do metro” que possibilita aos estados membros atuarem em conjunto em questões relacionadas com a ciência e padrões de medição [9].

A organização propõe-se a trabalhar com os Institutos Nacionais de Metrologia (NMI) dos estados membros e parceiros estratégicos internacionais, servindo-se do seu *status* imparcial

para representar a comunidade de medição mundial e desenvolver oportunidades para aplicação da metrologia a desafios globais.

Para além do já referido, esta organização tem a seu cargo [9]:

- Estabelecer e manter os padrões de referência adequados, para estes serem utilizados como base de comparações internacionais ao mais alto nível, servindo de suporte para calibrações;
- Promover e desenvolver o sistema internacional de unidades (SI).

2.5. Sistema Internacional de Unidades

O Sistema Métrico Decimal criado em 1789 adotou, inicialmente, três unidades básicas de medida: o metro, o litro e o quilograma [10].

Mais tarde, na Convenção do Metro realizada em Paris em 1875, este sistema foi adotado internacionalmente [3].

Na 10ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) ficou definida a unidade de temperatura termodinâmica, kelvin.

Em 1960, na 11ª CGPM ficou estabelecido o sistema internacional de unidades (SI) [3].

Atualmente, o SI é composto por sete unidades base, que em conjunto com as unidades derivadas formam um sistema coerente que permite definir todas as unidades de medida do sistema internacional [11].

As sete grandezas base que correspondem às sete unidades base encontram-se relacionadas na tabela 2.1. As restantes grandezas são designadas por grandezas derivadas e são expressas usando unidades derivadas, definidas como produtos de potências de unidades de base [5].

Tabela 2.1 - Grandezas base e unidades base SI [5]

Grandeza base	Unidade Base	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	kilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente elétrica	ampere	A
Temperatura Termodinâmica	kelvin	K
Quantidade de matéria	mole	mol
Intensidade Luminosa	candela	cd

O SI é o sistema de unidades adotado e recomendado pela CGPM que define os nomes, símbolos e as unidades assim como os prefixos, múltiplos e submúltiplos das mesmas unidades [11].

2.5.1. Unidade de Base da Grandeza Temperatura-kelvin

A unidade de temperatura termodinâmica, kelvin é a fração $1/273,16$ da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água. Assim, o valor do ponto triplo da água é de $273,16\text{ K}$ e corresponde ao ponto em que coexistem, em equilíbrio, os três estados físicos da água: sólido, líquido e gasoso [12].

Para a realização do ponto triplo da água, a composição isotópica da água é definida pelos seguintes rácios: $0,00015576$ mole de ^2H por mole de ^1H , $0,0003799$ mole de ^{17}O por mole de ^{16}O e $0,0020052$ mole de ^{18}O por mole de ^{16}O [13].

A unidade derivada do sistema internacional da grandeza temperatura (t) é o grau celsius, símbolo $^{\circ}\text{C}$, que respeita a mesma definição da grandeza kelvin.

A escala de medição de temperatura celsius é definida pela diferença entre a temperatura termodinâmica (T) e a temperatura do ponto de congelação da água ($T_0 = 273,15\text{K}$).

$$t = T - T_0 \quad (2.1)$$

Onde:

t – temperatura em $^{\circ}\text{C}$

T – temperatura termodinâmica, em kelvin

T_0 – temperatura do ponto de congelação da água.

Diferenças e/ou intervalos de temperatura podem ser expressos tanto em graus celsius como em kelvin, com o mesmo valor numérico, sendo que estas duas grandezas se relacionam através da equação (2.2).

$$t (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273,15 \text{ K} \quad (2.2)$$

A comunidade internacional encontra-se a trabalhar no sentido da redefinição do kelvin (K) em termos do movimento microscópico. A nova definição será baseada numa constante fundamental designada por Constante de Boltzmann que mede a energia cinética correspondente a um kelvin.

A vantagem desta nova definição é ser independente do artefacto usado ou método de medição permitindo, ainda, melhorar as incertezas de medição da temperatura.

2.6. Princípios de Avaliação da Incerteza de Medição

Uma medição tem como objetivo determinar o valor de uma mensuranda, ou seja, obter o valor da grandeza que se pretende medir [14]. Esta é dita mais exata quando fornece um menor erro de medição.

O resultado de uma medição corresponde ao conjunto de valores atribuídos a uma mensuranda e expressa-se por um único valor medido e uma incerteza de medição [5]. Assim, a declaração de um resultado de uma medição só está completa se incluir o valor atribuído à mensuranda e a incerteza de medição associada a esse valor [14]. Do exposto, é natural depreender-se que a incerteza surge como indicador da qualidade da medição, sendo imprescindível conhecer o seu valor para uma correta interpretação do resultado da mesma. É com base nestas premissas, que se inicia o presente subcapítulo, onde se apresenta o conceito de incerteza de medição e se introduz o método de avaliação de incertezas com base na metodologia apresentada no *Guide for The Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) [14].

2.6.1. Conceito de Erro e Incerteza de Medição

É necessário distinguir o conceito de incerteza de medição do conceito de erro pois, em linguagem corrente, são muitas vezes utilizados de forma incorreta.

Em regra, sempre que se realiza uma medição esta possui imperfeições que originam um erro no resultado da medição [14]. O erro de medição é, então, definido como a diferença entre o valor medido numa grandeza e um valor de referência [5].

$$\varepsilon = V_M - V_{Ref} \quad (2.3)$$

Onde:

ε - erro de medição numa grandeza

V_M - valor medido numa grandeza

V_{Ref} - valor de referência numa grandeza

Os erros provenientes de uma medição podem derivar de diversos fatores tais como: o operador, os instrumentos utilizados, as condições em que se desenvolve o procedimento experimental, entre outros [14]. Estes podem ter dois componentes: sistemático ou aleatório [14].

O erro sistemático diz respeito ao componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. As suas causas podem ser conhecidas ou desconhecidas. No caso de ser conhecida a causa do erro sistemático é possível aplicar uma correção de forma a compensar esta componente do erro. O erro sistemático é igual à diferença entre o erro de medição e o erro aleatório [5].

O erro aleatório corresponde à diferença entre o erro de medição e o erro sistemático e reflete a componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível.

Os erros aleatórios, que advêm de um conjunto de medições repetidas, formam uma distribuição que pode ser resumida pela sua esperança matemática, que é geralmente assumida como zero, e pela sua variância [5].

A incerteza de medição é um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma mensuranda, com base nas informações utilizadas [5]. A incerteza de medição inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associadas a correções e a valores atribuídos a padrões, assim como a incerteza definicional. Por vezes, os efeitos sistemáticos estimados não são corrigidos, nesses casos são incorporadas componentes de incerteza de medição associadas [5].

Os fenómenos que contribuem para a incerteza são chamados de fontes de incerteza.

São vários os fatores que contribuem como fonte de incerteza de medição, dos quais se destacam [14]:

- Amostragem não representativa;
- Conhecimento inadequado da influência das condições ambientais ou medição deficiente da mesma;
- Erros de leitura de instrumentos analógicos;
- Resolução finita dos instrumentos ou limiar de mobilidade;
- Valores inexatos dos padrões, materiais de referência, constantes e/ou outros parâmetros obtidos a partir de fontes externas;
- Aproximações e hipóteses consideradas no método e no procedimento de medição;
- Variações nas observações repetidas da mensuranda, aparentemente, sob as mesmas condições.

Neste trabalho, o cálculo da estimativa da incerteza de medição segue a metodologia descrita no GUM que comporta os seguintes passos [14]:

- 1) Expressar, matematicamente, a relação entre a mensuranda Y e as grandezas de entrada X_i das quais Y depende;
- 2) Determinar x_i , o valor estimado da grandeza de entrada X_i ;
- 3) Avaliar a incerteza-padrão de cada estimativa de entrada x_i ;
- 4) Avaliar as covariâncias associadas a quaisquer estimativas de entrada que sejam correlacionadas;
- 5) Calcular a estimativa y da mensuranda Y , a partir da relação funcional f , utilizando para as grandezas de entrada X_i as estimativas x_i obtidas no passo 2;
- 6) Determinar a incerteza-padrão combinada a partir das incertezas padrão e covariâncias associadas às estimativas de entrada;
- 7) Calcular o fator de expansão k com base no nível de confiança requerido;

8) Calcular a incerteza expandida.

A grandeza sujeita à medição designa-se por mensuranda. Em calibrações, é usual a utilização de apenas uma mensuranda ou grandeza de saída Y que depende de um determinado número de grandezas de entrada X_i ($i=1, 2, \dots, N$) de acordo com a relação funcional [15]:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.4)$$

Onde:

Y - grandeza de saída

X_i - grandezas de entrada

A função modelo f representa o procedimento de medição e o método de avaliação, descrevendo como os valores da grandeza de saída Y são obtidos a partir das grandezas de entrada X_i [15].

2.6.2. Avaliação das Estimativas das Grandezas de Entrada

A incerteza de medição, associada às estimativas das grandezas de entrada, engloba várias componentes que podem ser estimadas de acordo com dois métodos. Avaliação de Tipo A e avaliação de Tipo B. As componentes estimadas por uma avaliação de Tipo A podem ser caracterizadas por desvios-padrão a partir da distribuição estatística dos valores resultantes de séries de medições. As outras componentes, estimadas por uma avaliação de Tipo B, são caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outro conhecimento [5].

2.6.2.1. Avaliação de Tipo A da Incerteza de Medição

A avaliação de tipo A da incerteza-padrão é o método de avaliação de incerteza pela análise estatística de uma série de observações [15]. Esta avaliação pode ser empregue quando são realizadas várias observações independentes, nas mesmas condições, para uma das grandezas de entrada X_i .

Para n observações ($n > 1$) estatisticamente independentes, a estimativa da grandeza q é \bar{q} que corresponde à média aritmética dos valores individualmente observados e é dada pela equação (2.5) [14]:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (2.5)$$

Onde:

q - grandeza de entrada X_i medida repetidamente

n - número de observações

\bar{q} - média aritmética dos valores individualmente observados q_j , com $j = 1, 2, \dots, n$

A variância experimental, $s^2(q)$, dos valores q_j , é dada pela equação (2.6) e representa uma estimativa da variância da correspondente distribuição de probabilidade [14].

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (2.6)$$

Onde:

$s^2(q)$ - variância experimental dos valores q_j

A raiz quadrada positiva da expressão (2.6) designa-se por desvio-padrão experimental e caracteriza a dispersão dos valores em torno de sua média [14].

Para obter a melhor estimativa da variância de \bar{q} , ou seja, a variância experimental da média ($s^2(\bar{q})$), basta dividir a equação (2.6) pelo número de observações n . Da mesma forma, a raiz quadrada positiva desta variância é denominada de desvio-padrão experimental da média [15].

A incerteza-padrão, $u(\bar{q})$, relativa à estimativa da grandeza de entrada \bar{q} é o desvio-padrão experimental da média [14]:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (2.7)$$

2.6.2.2. Avaliação de Tipo B da Incerteza-Padrão

A avaliação da incerteza-padrão do tipo B é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não os da análise estatística de uma série de observações. A incerteza-padrão, $u(x_i)$, é avaliada com base no conhecimento científico e em toda a informação disponível sobre a variabilidade de X_i , destacam-se [14]:

- Dados de medições prévias;
- Experiência e/ou conhecimento geral do comportamento e das propriedades dos materiais e instrumentos;
- Especificações dos fabricantes;
- Dados provenientes de certificados de calibração e outros;
- Incertezas atribuídas a dados de referência de manuais.

Uma avaliação segundo o método de tipo B da incerteza-padrão requer uma análise com bom senso, baseada na experiência e no conhecimento técnico e, se bem fundamentada, é tão confiável quanto uma avaliação de tipo A [14].

As contribuições para a incerteza avaliadas pelo método de tipo B são caracterizadas em termos de desvios-padrão com base nas distribuições de probabilidade consideradas.

As distribuições mais usuais no âmbito da metrologia são a distribuição normal, distribuição retangular e distribuição triangular e serão descritas em mais detalhe nas próximas secções [14].

2.6.2.3. Distribuição Normal

A figura 2.3 representa uma distribuição normal de probabilidade. Este tipo de distribuição aplica-se quando a estimativa para a grandeza de entrada X_i é obtida de certificados de calibração, especificações de fabricantes ou outras incertezas-padrão [14].

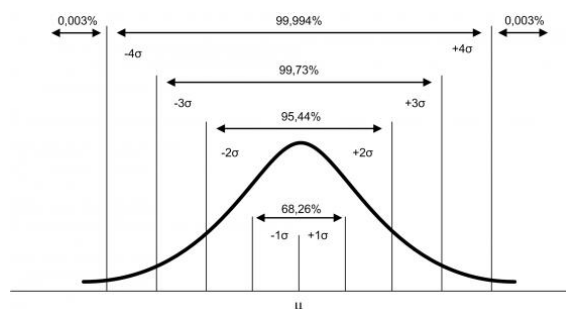


Figura 2.3 - Distribuição normal [16]

A incerteza-padrão é calculada através da equação (2.8):

$$u(x_i) = \frac{a}{k} \quad (2.8)$$

Onde:

a - valor da incerteza

k - fator de expansão

2.6.2.4. Distribuição Retangular

A distribuição retangular é a distribuição mais utilizada para representar o comportamento das grandezas de entrada, não só quando a informação disponível é insuficiente, pois esta distribuição adota uma atitude pessimista, mas principalmente, na ausência de qualquer outra informação que não a dos seus limites de variabilidade [14].

A figura 2.4 representa uma distribuição retangular com densidade de probabilidade constante entre o limite inferior a_- e o limite superior a_+ .

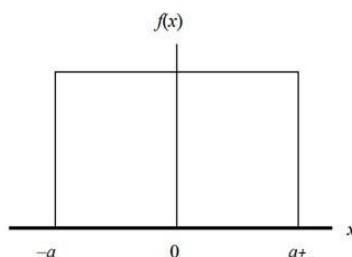


Figura 2.4 - Distribuição retangular. Adaptado de [17]

A incerteza padrão é obtida através da equação (2.9) [14]:

$$u(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad (2.9)$$

Se a diferença entre os valores limites for igual a $2a$, então a equação (2.9) simplifica-se e origina a expressão (2.10) [14]:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

2.6.2.5. Distribuição Triangular

A figura 2.5 representa uma distribuição triangular. Recorre-se a este tipo de distribuição sempre que os valores centrais da grandeza são mais prováveis que os valores dos limites [14].

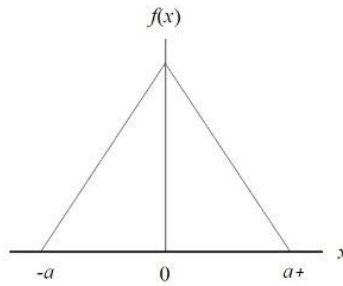


Figura 2.5 - Distribuição triangular. Adaptado de [17]

Considerando-se $2a$ o intervalo de valores dados à distribuição, então, a incerteza-padrão é dada por [14]:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.11)$$

2.6.3. Avaliação das Estimativas das Grandezas de Saída

Considerando as grandezas de entrada não correlacionadas entre si, o quadrado da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída y é dado pela equação (2.12) [14]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (2.12)$$

A contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída y , $u_i(y)$ é dada por [14]:

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (2.13)$$

Onde:

c_i - coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza de entrada x_i

$u(x_i)$ - incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada x_i

O coeficiente de sensibilidade é calculado através da derivada parcial da função f em relação às grandezas de entrada X_i [15]:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (2.14)$$

O coeficiente de sensibilidade c_i evidencia a influência da variação de cada uma das estimativas das grandezas de entrada, x_i , na estimativa da grandeza de saída y .

Para grandezas de entrada correlacionadas, ou seja, mutuamente dependentes, a estimativa para a incerteza considera as covariâncias associadas, é dada pela Lei da Propagação de Incerteza retratada na equação (2.15) [15]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i, x_j) \quad (2.15)$$

2.6.4. Incerteza de Medição Expandida

A incerteza de medição expandida U , é calculada através da multiplicação da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ pelo fator de expansão k [15]:

$$U = k u(y) \quad (2.16)$$

No caso da distribuição de probabilidade atribuída à mensuranda ser a distribuição normal, o fator de expansão k assume o valor de 2 e corresponde a uma probabilidade de expansão de aproximadamente de 95 % [15].

Nos restantes casos, é necessário obter um fator de expansão adequado que garanta uma probabilidade de expansão de 95 %, para tal é necessário determinar os graus de liberdade efetivos. O número de graus de liberdade efetivos é uma medida adequada de fiabilidade da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída.

Verificadas as condições do Teorema do Limite Central, o número de graus de liberdade efetivos v_{ef} da incerteza-padrão $u(y)$ é calculado através da fórmula de Welch-Satterthwaite [14]:

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.17)$$

Onde:

v_i - número de graus de liberdade efetivos da componente da incerteza-padrão $u_i(y)$

Para uma incerteza-padrão, $u(\bar{q})$, obtida de uma avaliação de tipo A, o número de graus de liberdade é dado por $v_i = n - 1$.

Para uma incerteza-padrão avaliada por tipo B, os graus de liberdade são considerados como $v_i \rightarrow \infty$. Nesta hipótese, são definidos os limites inferior a_- e superior a_+ para que a probabilidade de a grandeza estar fora destes limites seja extremamente pequena.

Quando não existe essa garantia, assume-se $v_i = 50$.

O fator de expansão k é obtido através da tabela 2.2, que foi construída com base na distribuição t de Student avaliada para uma probabilidade de expansão de 95,45 %. No caso do valor de v_{ef} calculado não ser inteiro, trunca-se v_{ef} para o inteiro imediatamente inferior.

Tabela 2.2 - Fatores de expansão versus número de graus de liberdade efetivos [15]

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

O resultado completo da medição, presente nos certificados de calibração, consiste na estimativa y da mensuranda e na incerteza expandida associada U na forma: $Y = y \pm U$.

3. Medição de Humidade

Ao longo deste capítulo ilustram-se alguns conceitos fundamentais no âmbito da higrometria, apresentando-se o funcionamento de equipamentos de geração de humidade e instrumentos de medição da mesma grandeza.

3.1. Conceitos Fundamentais no Âmbito da Higrometria

A presença de vapor de água no ar atmosférico ou em qualquer outro gás designa-se por humidade [18].

A humidade afeta não só diversas propriedades do ar, como também os materiais que se encontram em contato com este meio, influenciando um vasto leque de processos físicos, químicos e biológicos. Assim sendo, a medição desta grandeza é de elevado interesse por parte de múltiplas indústrias tais como alimentar, farmacêutica, química, papel, madeiras, produzindo impacto a nível de custos, qualidade de produtos, saúde e segurança [19].

A higrometria é a ciência responsável pelo estudo da humidade e tudo o que lhe está relacionado [18].

Designa-se por higrómetro qualquer aparelho capaz de medir humidade [18].

Devido à complexidade da grandeza humidade, esta pode ser expressa de diversas formas sendo de extrema importância a compreensão e o conhecimento de determinados termos e definições. Neste contexto, apresentam-se alguns conceitos fundamentais que se consideraram mais relevantes para o presente estudo.

– Humidade Relativa

Designa-se por humidade relativa e expressa-se em percentagem, a relação entre a pressão parcial de vapor de água e a pressão de vapor saturante sobre uma superfície plana de água à mesma temperatura [20]:

$$HR = \frac{p}{p_s(T)} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

HR - humidade relativa

p - pressão parcial de vapor de água

p_s - pressão de vapor saturante

– **Pressão de Vapor Saturante**

A pressão de vapor saturante, (p_s), corresponde à pressão de vapor em equilíbrio com a água no estado líquido à temperatura T . Representa o valor máximo que a pressão parcial de vapor (p) pode atingir à temperatura T antes de se dar o fenómeno de condensação. Esta grandeza expressa-se em Pascal (Pa) [20].

– **Pressão Parcial de Vapor de Água**

A pressão exercida pelo vapor de água à temperatura do ar húmido sob um dado volume denomina-se pressão parcial de vapor de água [18].

– **Temperatura de Ponto de Orvalho**

A temperatura de ponto de orvalho, em inglês *dew point*, é a temperatura até à qual é necessário arrefecer o ar húmido de modo a se atingir a saturação, mantendo constante a proporção de vapor de água no ar durante o arrefecimento [20].

O ponto de orvalho é uma medida absoluta de humidade de um gás que se relaciona diretamente com a pressão parcial de vapor de água.

A temperatura de ponto de orvalho é expressa em graus Celsius (°C).

$$p = p_s(T_{po}) \quad (3.2)$$

Onde:

T_{po} - temperatura de ponto de orvalho

– **Temperatura de Ponto de Geada**

Para valores de temperatura de ponto de orvalho inferiores a 0 °C utiliza-se o termo ponto de geada que se refere à temperatura em que a pressão de vapor de um gás húmido se iguala à pressão de vapor de saturação sobre gelo [18].

– **Razão de Mistura**

Define-se como razão de mistura, a relação entre a massa de vapor de água, e a massa de ar seco, com a qual o vapor de água se encontra misturado [18].

$$r = \frac{m_v}{m_a} \quad (3.3)$$

Onde:

r - razão de mistura

m_v - massa de vapor de água

m_a - massa de ar seco.

3.2. Métodos de Medição de Humidade

Nas próximas secções, aborda-se o princípio de funcionamento de alguns instrumentos de medição de humidade relativa com o objetivo de complementar o estudo da grandeza humidade.

3.2.1. Princípios de Funcionamento de Higrómetros

O higrómetro é constituído por duas partes fundamentais: unidade de leitura e sensor. O sensor é o elemento dum sistema de medição que é diretamente afetado por um fenómeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida [5].

Existem diferentes tipos de higrómetros com princípios de funcionamento distintos.

Apresentam-se abaixo o princípio de funcionamento dos higrómetros que se consideram mais relevantes no âmbito dos objetivos do presente estudo.

3.2.1.1. Impedância Elétrica

Este tipo de higrómetro é fabricado a partir de um material higroscópico que altera as propriedades elétricas do sensor, através da absorção de moléculas de água. As variações de humidade são medidas através da alteração da capacitância ou da resistência do sensor ou uma combinação das duas. Normalmente estes higrómetros vêm equipados com um sensor de temperatura [21].

Existem três tipos distintos de sensores que baseiam o seu funcionamento no acima descrito.

Os sensores capacitivos têm uma resposta próxima da humidade relativa, contrariamente aos sensores de ponto de orvalho e, caracterizam-se por uma melhor linearidade para baixos intervalos de medição de humidade relativa e por o seu funcionamento não ser afetado pela condensação [21].

Tal como os sensores capacitivos, os resistivos apresentam uma resposta próxima da humidade relativa, obtendo-se uma melhor linearidade para intervalos de medição que compreendem humidades relativas altas. A maioria destes sensores não tolera condensação.

Um caso particular dos sensores de impedância elétrica são os sensores de ponto de orvalho que têm por base o mesmo princípio, no entanto são utilizados para medir valores absolutos. Este tipo de sensores proporciona uma resposta em pressão parcial de vapor de água que, depois, pode ser convertida para outras unidades absolutas. Os sensores de ponto de orvalho operam num vasto intervalo de medição, tendo capacidade para medir humidade em gases [21].

3.2.1.2. Condensação

A temperatura de ponto de orvalho pode ser determinada através do arrefecimento de uma amostra de gás até ocorrer a condensação, observando a temperatura a que este fenómeno acontece. Este tipo de higrómetro contém um pequeno espelho que deteta de forma ótica a formação de condensação através de alterações na reflexão e/ou dispersão da luz [21].

3.3. Influência da Temperatura e Pressão na Medição de Humidade Relativa

A temperatura é um fator de elevada relevância na medição de humidade, sendo o seu efeito transversal a todos os tipos de higrómetros com resultados que variam de instrumento para instrumento [21].

Assim, a calibração de um higrómetro, em humidade relativa, deve ser realizada para valores de temperatura iguais ou próximos da temperatura de utilização.

A humidade relaciona-se de forma direta com a temperatura através da pressão de vapor saturante, ou seja, a capacidade que um gás tem em reter vapor de água é tanto maior quanto a temperatura a que este se encontra [21].

No gráfico da figura 3.1 pode observar-se o comportamento da pressão de vapor saturante com a temperatura.

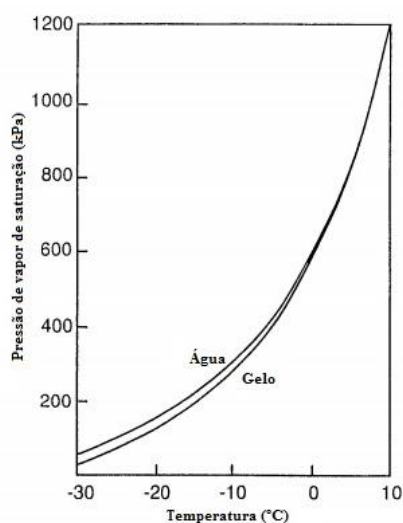


Figura 3.1 - Variação da pressão de vapor saturante com a temperatura [21]

Relembrando que a pressão de vapor saturante corresponde à capacidade que um gás tem em reter vapor de água, verifica-se que esta é tanto maior quanto a temperatura a que o gás se encontra.

Ao analisar a equação (3.1) constata-se que a humidade relativa e a pressão de vapor saturante são inversamente proporcionais, concluindo-se que com o aumento de temperatura, a humidade relativa diminui.

Para melhor compreender como a pressão influencia a umidade é necessário compreender o conceito associado à lei de Dalton ou lei das pressões parciais. Esta lei estabelece, que a pressão total exercida por uma mistura gasosa é igual à soma da pressão parcial de cada um dos gases que a compõe, assumindo que os gases têm um comportamento de gás ideal [22].

A equação (3.4) expressa a lei de Dalton

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (3.4)$$

Onde:

P_t - pressão total do gás

P_1, P_2, P_3, P_n - pressão que cada elemento iria exercer sobre o mesmo volume se nele estivesse sozinho

Sabendo que a umidade relativa é expressa pela razão entre a pressão existente e a pressão de vapor de saturante, ao variar a pressão total, a pressão do vapor de água vai-se alterar e consequentemente o valor de umidade relativa.

A influência das grandezas pressão e temperatura tem associada alguma complexidade, salientando-se alguns casos particulares que têm especial interesse em medições de umidade.

- A expansão ou compressão de um gás não afeta o valor de umidade relativa, se se mantiver constante o razão de mistura [23].
- Mantendo-se constante a temperatura e duplicando a pressão a uma umidade relativa de 40 %, o valor de HR vai também duplicar e passar a 80 % HR [21].
- A temperatura de ponto de orvalho é medida a partir da pressão parcial de vapor de água, concluindo-se que, se a pressão total sofrer uma variação, a temperatura de ponto de orvalho também se vai alterar [23].

3.4. Métodos de Geração de Umidade

A calibração em umidade é normalmente realizada por comparação do instrumento que se pretende calibrar com um padrão de referência, num meio termorregulado.

O meio termorregulado proporciona, ao higrómetro a calibrar, um meio estável com umidade e temperatura controlada que, em conjunto com o higrómetro padrão, permite a realização da calibração.

Atualmente são vários os métodos existentes no que diz respeito à geração de umidade, pelo que a escolha do tipo de gerador de umidade, tanto para utilização como meio termorregulado, como para funcionar como padrão de referência deverá ter em consideração alguns pontos, tais como [23]:

- A grandeza que se pretende medir;
- O intervalo de medição de humidade e temperatura;
- A performance que se pretende do instrumento (resolução do aparelho, estabilidade a curto prazo, deriva a longo prazo, entre outros);
- O princípio de funcionamento do instrumento.

Destacam-se, como exemplo, os principais métodos de geração de humidade, apresentando-se uma breve descrição do funcionamento dos instrumentos referidos.

No gerador de ponto de orvalho o gás é saturado com vapor de água a uma dada temperatura. Dependendo da eficiência do modelo do instrumento, isso produzirá um gás com uma temperatura de ponto de orvalho mais ou menos próxima da temperatura do saturador. Este tipo de gerador pode ser fabricado com diferentes princípios de funcionamento sendo o gerador de ponto de orvalho por espelho, o higrómetro mais requerido em laboratórios nacionais [23].

No gerador de duas temperaturas o gás é saturado a uma dada temperatura, definindo o seu ponto de orvalho ou a pressão de vapor. De seguida, o gás é transferido para uma câmara que se encontra a uma temperatura mais alta. Ao variar uma ou ambas as temperaturas, é possível obter qualquer valor escolhido de humidade relativa ou temperatura de ponto de orvalho [23].

Outro exemplo de gerador de humidade é o gerador de duas pressões. Neste gerador, o gás é saturado com vapor de água a elevada pressão e depois expandido a uma baixa pressão, mantendo-se constante a temperatura durante o processo. À medida que a pressão total decresce, a pressão parcial de vapor de água também diminui. Sabendo a humidade inicial é então possível descobrir o valor de humidade após a expansão do gás. Variando as grandezas pressão e temperatura simultaneamente ou em separado consegue-se obter diferentes valores de humidade relativa ou temperatura de ponto de orvalho [23].

Como último exemplo referem-se as câmaras. Este tipo de gerador disponibiliza controlo de temperatura e humidade. Nestas câmaras, a humidade pode ser gerada maioritariamente de três formas: através de vapor, por pulverização de água ou recorrendo a banhos de água [24].

4. Caraterização dos Procedimentos de Medição de Humidade

A calibração de instrumentos de medição de humidade, por norma, realiza-se por comparação do instrumento a calibrar com um padrão de referência, num meio termorregulado. Este meio proporciona um ambiente estável com humidade e temperatura controlada.

O laboratório de temperatura do Instituto Português da Qualidade, realiza a calibração de higrómetros em humidade relativa no intervalo de medição de 10 % a 90 %, utilizando como padrão, um higrómetro de ponto de orvalho e como meio termorregulado uma câmara climática.

Neste capítulo, vão-se descrever os equipamentos disponíveis no laboratório de temperatura com capacidade de geração de humidade, evidenciando o seu funcionamento e especificações. Neste contexto, apresenta-se o método de calibração utilizado pelo laboratório, explicitando o procedimento experimental, cálculos e resultados adquiridos fruto da calibração de um higrómetro.

4.1. Equipamentos

Foi realizada uma análise dos equipamentos disponíveis no laboratório de temperatura, assim como, do procedimento experimental utilizado, com o intuito de avaliar teoricamente a capacidade da câmara climática em funcionar como padrão. Nas próximas secções descreve-se pormenorizadamente o modo operativo tanto do higrómetro de temperatura de ponto de orvalho como da câmara climática de duas pressões.

4.1.1. Higrómetro de Temperatura de Ponto de Orvalho

O higrómetro de temperatura de ponto de orvalho adquirido pelo laboratório de temperatura é da marca MBW modelo 373H e funciona conjuntamente com a câmara climática como padrão nacional de humidade.

Na figura 4.1 é possível visualizar o equipamento.



Figura 4.1 - Higrómetro de ponto de orvalho MBW-373H [25]

Este modelo é constituído por um espelho no qual é feito incidir um feixe de luz. O espelho está ligado a uma bomba de calor termoelétrica, conhecida como elemento de *Peltier*, e a um recetor que, por ser sensível à luz, mede a intensidade de reflexão da luz como ilustrado no esquema da figura 4.2.

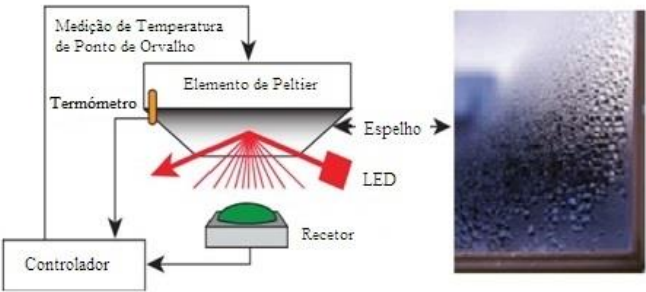


Figura 4.2 - Esquema de funcionamento do higrómetro de ponto de orvalho. Adaptado de [26]

A intensidade de luz refletida será máxima quando a superfície do espelho se encontrar limpa e seca. Quando o espelho se encontra frio e com vapor de água condensado na sua superfície, ocorre uma diminuição da luz refletida, reduzindo a intensidade de sinal captado pelo recetor. O instrumento em análise recebe o fluxo de ar proveniente do ambiente gerado pela câmara climática que, ao passar pelo espelho, arrefece-o, criando uma camada de vapor de água na sua superfície. Nessa fase, quando a camada de vapor de água se torna uniforme e em equilíbrio com o ar, é determinada a temperatura de ponto de orvalho (ou geada) através de um termómetro de resistência de platina (PRT-100) que mede a temperatura do espelho [25]. A humidade é, então, dada em temperatura de ponto de orvalho, podendo a partir desta ser transformada para humidade relativa (ver (4.9)).

Apresenta-se na tabela 4.1 as especificações técnicas deste equipamento.

Tabela 4.1 - Especificações técnicas do higrómetro de ponto de orvalho [25]

Parâmetros	Valor de Referência
Intervalo de medição	-20 °C a +70 °C
	5 % a 95 %
Exatidão da temperatura de ponto de orvalho/geada	± 0,01 °C
Reprodutibilidade	± 0.05 °C
Pressão da amostra de gás	2.5 bar
Condição ambiente de operação	15 °C a 35 °C
	5 % HR a 90 % HR

Durante a calibração, os dados relativos à temperatura de ponto de orvalho medida pelo termómetro são adquiridos através do *software ControLog*. Este *software*, integrante da câmara climática, permite adquirir simultaneamente os dados relativos ao higrómetro e à câmara e será abordado em mais detalhe nas próximas secções.

4.1.2. Câmara Climática de Duas-Pressões

A câmara climática de duas-pressões, modelo 2500ST do fabricante *Thunder Scientific Corporation* (figura 4.3), é o equipamento utilizado pelo laboratório como meio termorregulado. Esta câmara opera segundo o método de duas pressões, desenvolvido pelo NBS - *National Bureau of Standards* (atual NIST - *National Institute of Standards and Technologies*) que tem por base a Lei de Dalton das Pressões Parciais já descrita neste documento [27].



Figura 4.3 - Câmara climática de duas-pressões

Segundo a Lei de Dalton, o gás é saturado com vapor de água a uma dada pressão e temperatura e expandido isotermicamente até atingir a pressão da câmara após atravessar uma válvula de expansão. Os valores de humidade relativa são gerados para temperaturas fixas.

Considerando que o gás se comporta como gás ideal e existe equilíbrio térmico entre o saturador e câmara, a humidade relativa é aproximadamente igual à razão entre a pressão de saturação e a pressão da câmara [28]:

$$HR \approx \frac{P_c}{P_s} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

P_c - pressão absoluta da câmara

P_s - pressão absoluta de saturação

Apresenta-se na figura 4.4, de forma esquemática, o funcionamento de um gerador de duas-pressões que tem por base a equação (4.1).

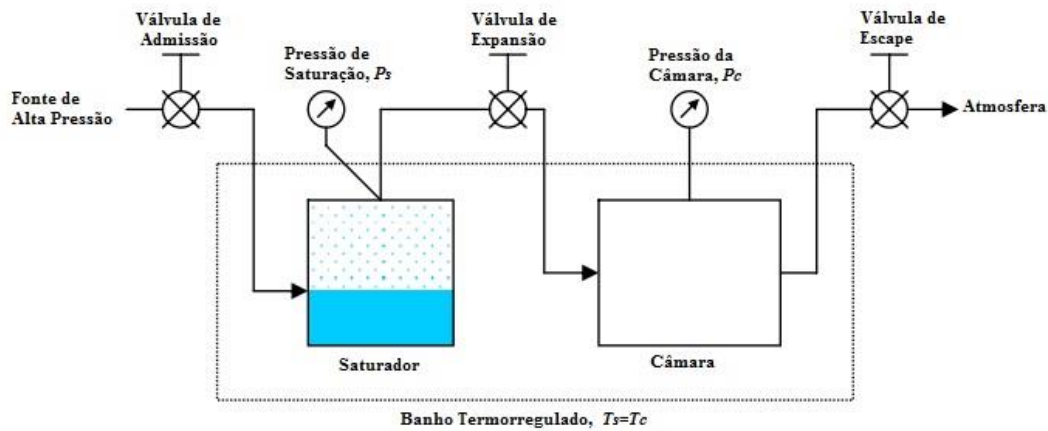


Figura 4.4 - Esquema simplificado do método de duas-pressões. Adaptado de [28]

A exatidão do gerador de duas-pressões pode ser substancialmente melhorada aferindo com exatidão os valores de temperatura do saturador e da câmara ao invés de pressupor o equilíbrio térmico entre elas [28].

É com base no referido acima, que se apoia o funcionamento da câmara em análise, que tem integrados quatro sensores de temperatura e dois sensores de pressão por forma a gerar humidade.

Considere-se o esquema apresentado na figura 4.5.

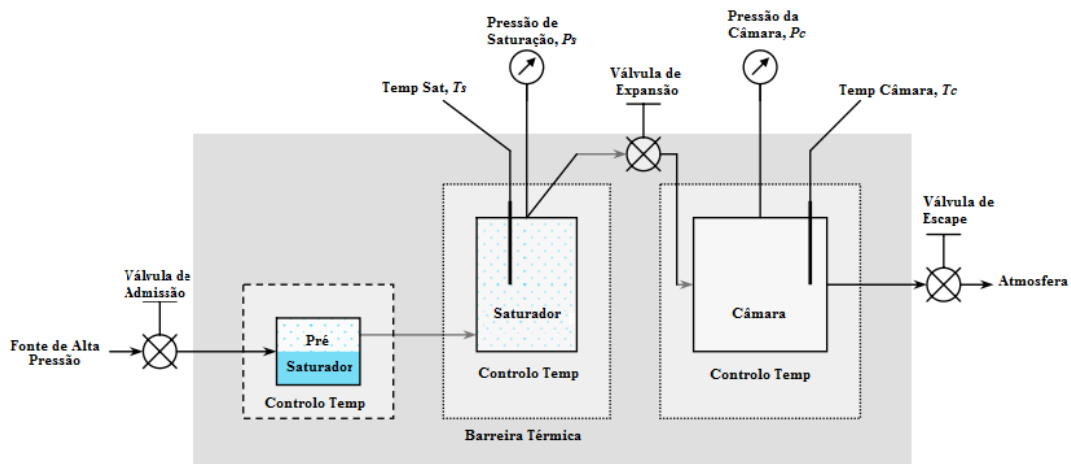


Figura 4.5 - Esquema de funcionamento câmara climática de duas-pressões. Adaptado de [28]

Neste sistema, o ar é saturado com vapor de água a uma pressão elevada (pressão de saturação) à temperatura de saturação (T_s). A corrente de ar é então expandida para uma pressão mais baixa (pressão atmosférica) atingindo a chamada temperatura da câmara [27].

Este sistema tem incorporado um pré-saturador. O uso de um pré-saturador garante a saturação total do ar ao tornar a mistura de ar e vapor de água numa mistura supersaturada [28].

Ao aquecer o ar a uma temperatura elevada, o teor de vapor de água presente na mistura torna-se maior que o necessário para ocorrer a saturação total. Quando a mistura flui para o saturador, esta arrefece ocorrendo a condensação do excesso de vapor de água [27].

Para determinar a humidade que é gerada pela câmara é, então, necessário conhecer o valor de pressão e temperatura aquando da saturação do ar (P_s e T_s) e os valores para as mesmas grandezas no interior da câmara (P_c e T_c). A equação (4.2) representa o modelo matemático que permite o cálculo de humidade relativa do modelo da câmara em análise [27].

$$HR = \frac{f_w(P_s, T_s)}{f_w(P_c, T_c)} \times \frac{e_w(T_s)}{e_w(T_c)} \times \frac{P_c}{P_s} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:

P_s - pressão de saturação

P_c - pressão da câmara

T_s - temperatura de saturação

T_c - temperatura da câmara

$e_w(T)$ - graus efetivos de saturação

$f_w(P, T)$ - fator de melhoramento (*Enhancement Factor*)

Os parâmetros de pressão e temperatura que constituem a equação (4.2) são medidos através de sensores. O termo da equação que equivale aos graus efetivos de saturação ($e_w(T)$) é calculado segundo a equação (4.3) e corresponde a um fator de correção de temperatura que toma valores diferentes da unidade quando são detetadas discrepâncias entre os valores de temperatura de saturação e de temperatura da câmara

$$e_w(T) = \exp \left\{ \left[\sum_{i=0}^6 C_i \times (T + 273.15)^{i-2} \right] + D \times \ln(T + 273.15) \right\} \quad (4.3)$$

Onde, T assume o valor de T_s ou de T_c em °C

e C e D são dadas por [29]:

$$C = \begin{bmatrix} -2,8365744 \times 10^3 \\ -6,028076559 \times 10^3 \\ 1,954263612 \times 10^1 \\ -2,737830188 \times 10^{-2} \\ 1,6261698 \times 10^{-5} \\ 7,0229056 \times 10^{-10} \\ -1,8680009 \times 10^{-13} \end{bmatrix}$$

$$D = 2,7150305$$

O fator de melhoramento ($f_w(P, T)$) é também um parâmetro de correção que está associado ao comportamento não ideal do gás de transporte. Este fator é função de duas variáveis independentes: a pressão e a temperatura. Como se verificam diferenças pouco significativas entre a temperatura de saturação e a temperatura da câmara, a maior alteração neste fator de correção advém das diferenças de pressão. Para valores de humidade próximos de 100 %, as diferenças de pressão são mínimas logo esta razão é aproximadamente igual a 1, não provocando alterações nos valores de humidade relativa. Por outro lado, para valores de humidade na ordem dos 5 %, as diferenças entre a pressão da câmara e de saturação tornam-se relevantes pelo que o valor de humidade é afetado por este fator [27].

A expressão para o cálculo do fator de melhoramento é dada por [27]:

$$f_w(P, T) = \exp \left[\alpha \left(1 - \frac{e_w(T)}{P} \right) + \beta \left(\frac{P}{e_w(T)} - 1 \right) \right] \quad (4.4)$$

Com α e β dados por:

$$\alpha = \sum_{i=0}^6 A_i T^i \quad (4.5)$$

$$\beta = \exp \left(\sum_{i=0}^3 B_i T^i \right) \quad (4.6)$$

As constantes A e B são dadas pelo documento do ITS-90 [29]:

$$A = \begin{bmatrix} 3,53624 \times 10^{-4} \\ 2,9328363 \times 10^{-5} \\ 2,6168979 \times 10^{-7} \\ 8,5813609 \times 10^{-9} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1,07588 \times 10^1 \\ 6,3268134 \times 10^{-2} \\ -2,5368934 \times 10^{-4} \\ 6,3405286 \times 10^{-7} \end{bmatrix}$$

Note-se a necessidade de efetuar o cálculo duas vezes para o fator de melhoramento, f_w , e para e_w , uma primeira vez, para os valores de temperatura e pressão da câmara e, uma segunda, para os valores de saturação das mesmas grandezas, resultando em dois fatores de melhoramento que serão utilizados na equação (4.2) para cálculo da humidade relativa.

Este modelo de câmara climática tem disponíveis três modos de controlo de humidade:

- Modo 1 (%HR @ Pc) – a humidade relativa é calculada com base na equação (4.1), porém não se considera o termo correspondente aos graus efetivos de saturação, ou seja, desprezam-se as diferenças de temperatura entre a temperatura da câmara e a temperatura do saturador;

- Modo 2 (%HR @ PcTc) – o valor de humidade relativa é calculado segundo a equação (4.2) considerando-se a contribuição de todos os termos;
- Modo 3 (SATURxxx) – Este modo de operação permite-nos obter valores de humidade relativa ao fixar o valor de pressão do saturador. Assim, a humidade gerada irá variar consoante as alterações sentidas nas temperaturas e pressões medidas.

Uma vez que o modo 2 oferece um valor mais estável e exato de humidade relativa, será este o modo de operação escolhido para os procedimentos realizados no âmbito dos objetivos da dissertação.

Este modelo funciona com ar comprimido e água destilada e as especificações fornecidas pelo fabricante podem ser consultadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Especificações técnicas da câmara climática [27]

Parâmetros	Valores de Referência
Intervalo de medição em humidade relativa	10 % a 95 %
Resolução em humidade relativa	0,01%
Incerteza em humidade relativa	$\pm 0,5 \% P_c T_c$
Intervalo de medição de temperatura da câmara	0 °C a 70 °C
Incerteza da câmara em temperatura	$\pm 0,06 ^\circ\text{C}$
Incerteza da câmara em Pa	$\pm 0,15 \% FS^1$
Taxa do fluxo de gás	2 a 20 l/min
Incerteza da taxa do fluxo de gás	$\pm 2 \% FS$

A medição e controlo de temperatura na câmara são realizados através de quatro termómetros de resistência de platina de 10 k Ω : RTD0, RTD1, RTD2, RTD3.

A temperatura de saturação é aferida e controlada pelo sensor RTD0. Os sensores RTD1 e RTD2 são responsáveis, respetivamente, pelo controlo e medição da temperatura do pré-saturador e da válvula de expansão.

A medição da temperatura da câmara fica a cargo do sensor RTD3. A temperatura é medida pela câmara através de uma contagem STD –A/D (*Analog to Digital Converter Board*) a 0.01 °C/bit. Esta conversão é realizada com base em curvas ideais R-T e é calculada internamente pela própria câmara [27].

A câmara possui dois transdutores de pressão piezoresistivos, T2 e T3, que operam em dois intervalos: 0-50 psia e 0-150 psia.

¹ Em relação ao valor do ponto de ajuste

Para pressões de saturação superiores a 50 psia, o sensor T2 monitoriza a pressão da câmara. Para pressões inferiores a 50 psia, este transdutor faz a monitorização da pressão de saturação e da pressão da câmara de forma alternada. O transdutor T3 mede exclusivamente a pressão de saturação quando esta atinge valores superiores a 50 psia [27].

A câmara está também equipada com um sensor de fluxo, que se aconselha que esteja sempre regulado para 20 l/min. Este parâmetro não é usado no cálculo da humidade, é apenas indicativo da quantidade do fluxo de ar que passa através do sistema e, só é relevante em ensaios com instrumentos de medição sensíveis ao fluxo, como psicrómetros. Assim sendo, este parâmetro não será estudado no âmbito do presente trabalho, pois os instrumentos calibrados não são sensíveis a alterações de fluxo.

No manual da câmara é referido a possibilidade de realizar uma calibração da mesma, através da calibração dos seus sensores de temperatura e pressão e introdução dos coeficientes obtidos no *software* para ajuste dos parâmetros calculados.

4.1.2.1. *Software 2500 ControLog™*

A câmara tem associado um *software* de aquisição de dados que permite controlar todos os parâmetros da mesma assim como efetuar o cálculo de diversos parâmetros de humidade.

O 2500 *ControLog™* automatiza totalmente a operação da câmara *Thunder Scientific 2500ST* e permite a conexão de diversos dispositivos, tais como o atual padrão nacional de humidade, o higrómetro de ponto orvalho- MBW 373H.

Este *software* permite a criação de perfis que possibilitam ao operador programar os parâmetros humidade, temperatura, pressão, fluxo e tempo para que a aquisição de dados seja feita de forma automática. Com esta função é possível definir os patamares de temperatura e humidade que se desejam assim como o tempo que a câmara permanece em cada patamar antes de passar para o próximo. Os dados do gerador são automaticamente armazenados em formato .dat.

O *software* possibilita a visualização de gráficos em tempo real que proporcionam ao operador uma imagem visual dos dados armazenados [30].

Uma outra ferramenta deste *software* prende-se no cálculo automático de parâmetros de humidade com base na equação de funcionamento da câmara e nos valores medidos pelos sensores de pressão e temperatura integrantes da mesma.

O ficheiro criado aquando da inicialização do programa contém, para além dos valores gerados de humidade e temperatura, uma lista de outros parâmetros de elevada relevância e que se encontram listados na figura 4.6.

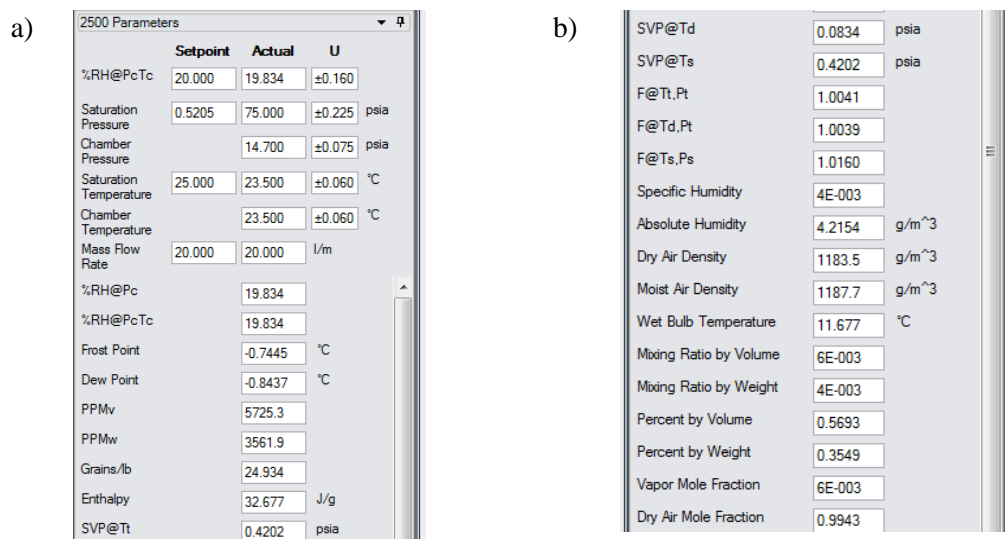


Figura 4.6 - Parâmetros fornecidos pelo *software ControLogTM*. a) - Parte 1, b) - Parte 2

Da lista apresentada destacam-se os parâmetros: %HR@PcTc, SVP@Ts, SVP@Tc, F@Ts,Ps e F@TcPc. O primeiro parâmetro, corresponde ao valor de humidade relativa calculado segundo a equação (4.2), o parâmetro seguinte, indica-nos o valor dos graus efetivos de saturação (e_w) para as duas temperaturas (saturação e câmara) e o último parâmetro de destaque, retrata o fator de melhoria (f_w) também calculado para dois pontos: saturação e câmara [30].

4.2. Calibração de Instrumentos de Humidade Relativa

De modo a complementar a análise realizada aos equipamentos disponíveis no laboratório, efetuou-se a revisão e atualização do procedimento de utilização da câmara de humidade a duas pressões, assim como, a revisão do procedimento de calibração de instrumentos de medição de humidade relativa.

Neste contexto, foi realizada a calibração de um higrómetro, com base no procedimento PT 5021012501-02 [31]. Os dados relativos a esta operação metrológica vão servir de referência aos resultados conseguidos nos estudos relativos à câmara climática.

Foi realizada a calibração de um higrómetro, pertencente ao laboratório de propriedade de líquidos do IPQ. O termohigrómetro sujeito a esta operação metrológica é da marca VAISALA, modelo PTU 301. A unidade de leitura tem uma resolução de 0,1 °C, em temperatura e 0,1 %, em humidade relativa.

O instrumento foi calibrado para os valores ilustrados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valores de calibração

Humidade Relativa	Temperatura
30 %	20 °C
50 %	15 °C
	20 °C
	25 °C
75 %	20 °C

4.2.1. Descrição do Método

A calibração foi realizada recorrendo à câmara climática 2500ST como meio termorregulado e ao higrómetro de ponto de orvalho MBW-373H como padrão.

O modelo matemático, para a calibração de um higrómetro por comparação com um higrómetro padrão, pode ser descrito, genericamente, pela expressão do erro de medição ($\varepsilon = t_s - t_{\text{ref}}$), que aplicado à leitura do sensor de temperatura em calibração (t_s) corresponderá à temperatura do meio estabelecida pelo termómetro padrão (t_{ref}).

A temperatura do sensor depende das seguintes correções:

$$t_s = \varepsilon + t_{\text{ref}} + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 \quad (4.7)$$

Onde:

ε - erro de medição

t_{ref} - temperatura do termómetro padrão

δ_1 - correção devida à calibração do padrão

δ_2 - correção devida à estabilidade do padrão

δ_3 - correção devida ao equipamento de leitura

δ_4 - correção devida à uniformidade do meio

δ_5 - correção devida à resolução da unidade de leitura do sensor

Relativamente às correções δ_i acima referidas, o seu valor médio é nulo, mas têm incerteza u_{bi} não nula. O mesmo tipo modelo aplica-se à medição de temperatura de ponto de orvalho e humidade relativa.

Antes de iniciar a calibração de qualquer higrómetro, é necessário verificar as suas características físicas, por forma a verificar a existência de quaisquer defeitos que possam impossibilitar uma correta calibração. Deve ser tido em atenção o funcionamento da unidade de leitura, o estado geral do sensor e as respetivas ligações elétricas.

Após verificadas as características físicas, o higrómetro a calibrar é ligado e de seguida disposto no interior da câmara climática mantendo visível o ecrã onde se apresentam os valores de humidade e temperatura dos mesmos.

A câmara e o higrómetro padrão estão ligados entre si através de uma manga, com um isolamento que permite evitar trocas térmicas com o exterior e eventual condensação e, por onde flui o ar, vindo do ambiente da câmara para o espelho do higrómetro.

Seguidamente liga-se a câmara climática e verifica-se o nível de água, o fluxo e o modo de funcionamento da mesma através das informações apresentadas no painel de controlo (figura 4.7).

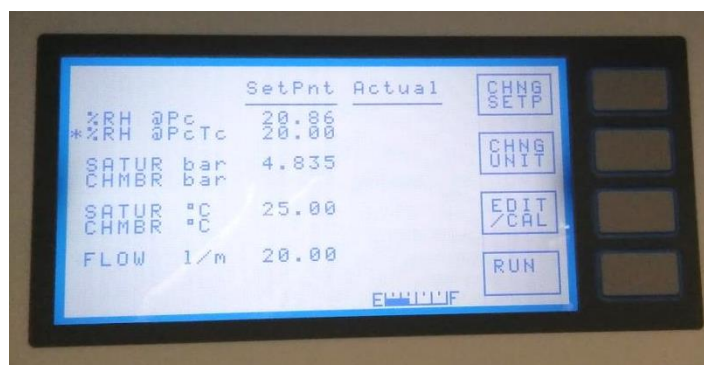


Figura 4.7 - Layout inicial do painel de controlo da câmara climática de duas-pressões

Verificados todos os parâmetros, acede-se ao *software 2500 ControLog™* e procede-se à criação de um novo perfil. Para cada patamar de temperatura e humidade foi atribuída, em média, a duração de duas horas. Observando o gráfico produzido pelo sistema e verificando que os dados gerados pela câmara estão estáveis, registam-se manualmente, para o higrómetro e para cada patamar, 10 valores de temperatura e humidade, assim como a hora deste registo. Este registo permite agilizar a análise dos resultados obtidos *software*.

4.2.2. Tratamento de Dados

Os ensaios foram realizados segundo as seguintes condições de referência:

$$t = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$$

$$HR = (50 \pm 10) \%$$

A título exemplificativo apresentam-se, nesta secção, os dados relativos ao ensaio com $t=15 ^\circ\text{C}$ e $HR = 50 \%$.

Exibem-se na tabela 4.4 os dados relativos aos parâmetros relevantes obtidos decorrentes do ensaio.

Tabela 4.4 - Exemplo de amostra de dados adquiridos pelo sistema para $15 ^\circ\text{C}$, 50% .

Hora	Temperatura Câmara (Tc) (°C)	HR @PC (%)	Temperatura de Ponto de Orvalho (°C)	Resistência. Espelho (Ω)	Resistência externa (Ω)
13:51	15,2753	50,4025	4,69179	101,891	105,89
13:52	15,271	50,3207	4,75904	101,917	105,89
13:53	15,2747	50,6784	4,86926	101,96	105,89
13:54	15,275	51,1169	4,9248	101,982	105,89
13:55	15,2776	50,8947	4,85838	101,956	105,89
13:56	15,2779	50,6537	4,81143	101,938	105,89
13:57	15,2705	50,876	4,83075	101,945	105,89
13:58	15,2662	51,2068	4,97135	102	105,89
13:59	15,2702	51,4283	4,97956	102,003	105,89
14:00	15,2741	51,1522	4,96148	101,996	105,89

Os dados relativos à câmara climática constituem as duas colunas da esquerda e, dizem respeito, aos valores de temperatura da câmara e de humidade relativa calculada pela câmara. Os valores que se apresentam nas colunas da direita correspondem aos dados medidos pelo padrão.

A coluna de dados relativa à resistência do espelho medida pelo termómetro de resistência de platina de 100 Ω , pode ser convertida para temperatura com base na norma EN 60751:2008 através da equação (4.8) [32]:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (4.8)$$

Onde, R_0 , A e B são constantes.

Esta equação é válida para o intervalo de medição em temperatura de 0 °C a 850 °C.

Consultando o certificado de calibração do higrómetro de ponto de orvalho (anexo I) e verificando o intervalo em que se encontra a temperatura de ponto de orvalho medida (-20 °C a 20 °C), obtêm-se os seguintes valores para as constantes:

$$R_0 = 99,9327 \, \Omega$$

$$A = 3,9065 \times 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -4,3897 \times 10^{-7} \, ^\circ\text{C}^{-2}$$

As temperaturas obtidas pela equação correspondem à temperatura de ponto de orvalho corrigida.

Recorrendo novamente à equação (4.8) e utilizando as constantes facultadas na norma EN-60751:2008 é possível obter o valor de temperatura ambiente da câmara.

As constantes correspondem, então, aos seguintes valores [32]:

$$R_0 = 100 \, \Omega$$

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \, ^\circ\text{C}^{-2}$$

Os valores obtidos para a temperatura de ponto de orvalho corrigido podem ser transformados em humidade relativa utilizando a equação de Sonntag [18]:

$$\ln p_s = -6096.9385 T^{-1} + 21.2409642 - 2.711193 \times 10^{-2} T + 1.673952 \times 10^{-5} T^2 + 2.433502 \ln T \quad (4.9)$$

Na tabela 4.5, apresentam-se os resultados corrigidos para os valores de temperatura e humidade relativa medidos pelo padrão com base na metodologia exposta.

Os cálculos foram efetuados através de uma Macro em Excel.

Tabela 4.5 - Resultados higrómetro de ponto de orvalho (15 °C, 50 %)

Resistência Espelho (Ω)	Temperatura Ponto Orvalho (°C)	Temperatura Ponto Orvalho Corrigida (°C)	Humidade Relativa Corrigida (%)	Resistência (Ω)	Temperatura Corrigida (°C)
101,891	4,692	5,019	50,309	105,887	15,279
101,917	4,759	5,086	50,560	105,885	15,274
101,96	4,869	5,196	50,942	105,886	15,276
101,982	4,925	5,253	51,150	105,885	15,274
101,956	4,858	5,186	50,897	105,887	15,279
101,938	4,811	5,140	50,750	105,885	15,274
101,945	4,831	5,158	50,805	105,886	15,276
102	4,971	5,299	51,307	105,886	15,276
102,003	4,980	5,306	51,326	105,887	15,279
101,996	4,961	5,288	51,262	105,887	15,279

O valor verdadeiro da temperatura é dado pela média dos 10 valores da temperatura do valor corrigido. O valor verdadeiro de humidade relativa corresponde à média dos valores de humidade relativa medidos pelo padrão e corrigidos. Os valores de temperatura e humidade registados pelo termohigrómetro são dados pela média dos 10 valores registados manualmente.

Na tabela 4.6 ilustram-se os valores verdadeiros de temperatura e humidade relativa e o valor medido pelo termohigrómetro para as mesmas grandezas.

Tabela 4.6 - Ensaio $t = 15\text{ °C}$ e $HR = 50\%$: resultados

	Valor Verdadeiro	Indicação do Termohigrómetro
Temperatura (°C)	15,276	14,4
Humidade Relativa (%)	50,931	46,4

A declaração de um resultado de medição só está completa quando acompanhado da incerteza associada.

Como são apresentados resultados para duas grandezas (temperatura e humidade) é necessário fazer o balanço de incerteza para as mesmas grandezas.

A incerteza de medição, $u_i(y)$, das estimativas das grandezas de entrada foi considerada de acordo com o modelo matemático apresentado na equação (4.10):

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) = u_{a1}^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2 + u_{b4}^2 \quad (4.10)$$

Para a grandeza temperatura, consideraram-se as componentes que se descrevem abaixo.

A componente de incerteza, u_{a1} , equivale à repetibilidade das medições e é avaliada pelo método do tipo A. Esta componente é obtida através da equação (4.11) e corresponde ao desvio-padrão da média do erro de medição.

$$u_{a1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (4.11)$$

O valor de incerteza expandida presente no certificado de calibração do padrão, considera-se como fonte de incerteza e é avaliada pelo método do tipo B. A componente de incerteza, u_{b1} , é então dada pelo valor de incerteza presente no certificado dividido pelo coeficiente de expansão ($k=2$).

$$u_{b1} = \frac{U_{calib}}{2} \quad (4.12)$$

Onde:

U_{calib} - valor de incerteza expandida presente no certificado de calibração do padrão

A componente de incerteza, u_{b2} , avaliada pelo método do tipo B, caracteriza a estabilidade do meio termorregulado e é obtida pelo desvio-padrão dos valores medidos pela câmara climática.

A uniformidade do meio termorregulado corresponde à componente, u_{b3} , e é avaliada pelo método do tipo B. O seu valor resulta da média da diferença entre o valor máximo e valor mínimo medido pela câmara. Esta componente de incerteza tem associada uma distribuição retangular.

A resolução da unidade de leitura equivale à componente, u_{b4} , também avaliada pelo método do tipo B. O seu valor corresponde ao menor valor que a unidade de leitura consegue medir dividida por dois, visto tratar-se de um instrumento digital. Foi considerada uma distribuição retangular.

Na tabela 4.7, demonstram-se as fontes de incerteza consideradas para a grandeza temperatura e as respetivas distribuições de probabilidade associadas para o ensaio com $t = 15^\circ\text{C}$, $HR = 50\%$.

Tabela 4.7 - Balanço de incerteza para a grandeza temperatura

Fonte de Incerteza	Símbolo	Limite Superior de Erro (z)	Incerteza u(z) / Desvio-padrão s(z)	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade a Incerteza Padrão Ci	Contribuição para u _i (g)	Variância u _i ² (g)	Nº de Graus de Liberdade
TIPO A									
a1: Repetibilidade Termómetro	°C		7,1E-04	Normal	1		0,0007	5,0709E-07	9
TIPO B									
b1: Calibração do padrão MBW373	°C	0,05		Normal	2,00	1	0,025	6,2500E-04	50
b2: Estabilidade da câmara	°C		3,69E-03	Normal	1	1	0,003685783	1,3585E-05	9
b3: Uniformidade da câmara	°C	0,006		Rectangular	1,73	1	0,003377499	1,1408E-05	50
b4: Resolução da Unidade de Leitura	°C	0,05		Rectangular	1,73	1	0,028867513	8,3333E-04	∞
Variância (TOTAL)								1,4838E-03	
Incerteza Padrão					2		0,04		281
Incerteza Expandida							0,1		

Para o balanço de incerteza associado à grandeza humidade relativa foi considerado o mesmo modelo matemático. Neste caso, no que respeita à componente relativa à calibração do padrão, a grandeza de entrada é temperatura de ponto de orvalho e as variações desta grandeza influenciam a variação da estimativa da grandeza de saída, humidade relativa.

O valor do coeficiente de sensibilidade corresponde ao acréscimo ou variação diferencial na estimativa da grandeza de saída.

Na tabela 4.8, ilustra-se a folha de cálculo com as contribuições consideradas para o mesmo ensaio, mas relativamente à grandeza humidade relativa para o mesmo ensaio.

Note-se que se destaca a laranja o valor do coeficiente de sensibilidade calculado.

Tabela 4.8 - Balanço de incerteza para a grandeza humidade

Fonte da Incerteza	Símbolo	Límite Superior de Erro \pm	Incerteza $u(x_i)$ / Desvio-padrão $s(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Coeficiente de Sensibilidade C_i	Contribuição para a Incerteza Padrão $u_i(y)$	Variância $u_i^2(y)$	Nº de Graus de Liberdade
TIPO A									
a1: Repetibilidade higrómetro	%		1,1E-01	Normal	1		0,1069	1,1431E-02	9 n-1
TIPO B									
b1: Calibração do padrão MBW373	°C	0,05		Normal	2	3,5399396	0,08849849	7,8320E-03	50 n-1
Coeficiente de sensibilidade									
PO RH									
b2: Estabilidade da Câmara	%		3,6E-01	Normal	1	1	0,360565521	1,3001E-01	9 n-1
b3: Uniformidade da câmara	%	5,5E-01		Rectangular	1,73	1	0,319736579	1,0223E-01	50
b4: Resolução da Unidade de Leitura	%	0,05		Rectangular	1,73	1	0,028867513	8,3333E-04	∞
Variância (TOTAL)									
2,5234E-01									
Incerteza Padrão									
0,50									
Incerteza Expandida									
2									
1,0									
30									
da dy d1/d1									
0,28723 1,01677 3,53994									

No anexo II, é possível consultar o certificado do equipamento, fruto desta operação metrológica.

5. Estudo de Aplicabilidade da Câmara Climática de Duas-Pressões

De modo a fundamentar a utilização da câmara climática de duas-pressões na qualidade de padrão em calibrações de humidade relativa é necessário efetuar um estudo de aplicabilidade da mesma.

No presente capítulo descrevem-se os estudos realizados.

5.1. Calibração da Câmara Climática de Duas-Pressões

No manual do fabricante deste equipamento é referida a possibilidade de realizar a calibração da câmara como instrumento de medição, ao calibrar os seus sensores de temperatura e pressão. Os sensores serão calibrados por comparação com um padrão cuja rastreabilidade se encontra assegurada a padrões primários. Dado que os termómetros de resistência de platina e os transdutores de pressão se encontram ligados ao processador da câmara, esta operação metrológica pretende calibrar a cadeia de medição em causa ao introduzir os valores medidos pelos padrões no painel de controlo de modo a gerar novos coeficientes.

5.1.1. Calibração dos Sensores de Temperatura

O procedimento empregue neste estudo segue as diretrizes estabelecidas no manual de utilizador deste modelo de equipamento.

Para efetuar este procedimento é necessário remover os quatro sensores de temperatura e inseri-los num banho termorregulado conjuntamente com um termómetro padrão. É aconselhada a calibração dos quatro sensores para os valores de temperatura de 0 °C, 20 °C, 35 °C, 50 °C e 70 °C [27].

Antes de iniciar o procedimento foi necessário avaliar e caracterizar os equipamentos a utilizar durante a calibração.

Termómetro Padrão

O termómetro padrão utilizado é um termómetro de resistência de platina em tubo de quartzo de 25,5 Ω (PRT-25) do fabricante Tinsley, modelo 5187SA com rastreabilidade metrológica aos pontos fixos. As especificações do termómetro encontram-se listadas abaixo:

- Número de série: 280439;
- Número de referência interno: Smt15;
- Intervalo de indicação: -190 °C a 661 °C;
- Incerteza expandida (intervalo de medição até 30°C): 0,001 °C;
- Incerteza expandida (intervalo de medição >30°C): 0,005 °C.

Na figura 5.1 é possível observar o termómetro padrão utilizado.



Figura 5.1 - PT-25 padrão

Ponte de resistência F-17

O termómetro padrão funciona em conjunto com uma ponte de resistências que permite a leitura automática e contínua da sua resistência. A ponte utilizada (figura 5.2) é da marca ASL, modelo F17A e número de série 609-2/077.



Figura 5.2 - Ponte de Resistência F-17

Esta ponte de resistências mede uma razão que é dada pelo quociente entre a resistência do termómetro e a resistência do padrão.

As especificações fornecidas pelo fabricante para este instrumento são as seguintes:

- Intervalo de medição: $-269,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Exatidão da razão: $\pm 0,4\text{ ppm}$;
- Resistência interna: $100\text{ }\Omega$;
- Resolução: $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Banho de Água Termorregulado

A calibração realiza-se por comparação dos termômetros a calibrar com o termómetro padrão imersos conjuntamente num banho termorregulado que opere no intervalo requerido.

O banho de água termorregulado utilizado ilustra-se na figura 5.3. O equipamento é da marca *Hart Scientific*, modelo 7012.



Figura 5.3 - Banho de água termorregulado

Abaixo evidenciam-se algumas especificações do equipamento:

- Intervalo de medição: 0 °C aos 90 °C;
- Resolução: 0,01 °C;
- Uniformidade: 0,001 °C.

Ponto de Gelo

Como o banho termorregulado utilizado não opera aos 0 °C, então, a calibração para este valor de temperatura foi realizada recorrendo ao ponto de gelo.

O ponto de gelo é um ponto fixo com um valor de referência de aproximadamente 0 °C. Este ponto é realizado através da junção de gelo triturado e água desmineralizada até se obter uma tonalidade acinzentada. A mistura é efetuada num *dewar* que assegura a sua conservação e facilita o processo de homogeneização.

Na figura 5.4 é possível visualizar o *dewar* com o ponto gelo realizado.



Figura 5.4 - Ponto de gelo

5.1.1.1. Metodologia

Antes de dar início à calibração, é necessário desligar o compressor e colocar na vertical a válvula que faz ligação com o último, de modo a manter o sistema de pressão aberto durante a operação. Para aceder aos sensores de temperatura foi necessário remover os painéis superiores e posteriores da câmara. Os sensores encontram-se devidamente identificados e são de fácil remoção. É necessário drenar cerca de 7 l do fluido de transferência (figura 5.5), através de um tubo dreno, situado na parte posterior da câmara, antes de proceder à remoção dos sensores. Este fluido será reintroduzido no sistema no final do procedimento através de um orifício situado na parte superior [27].

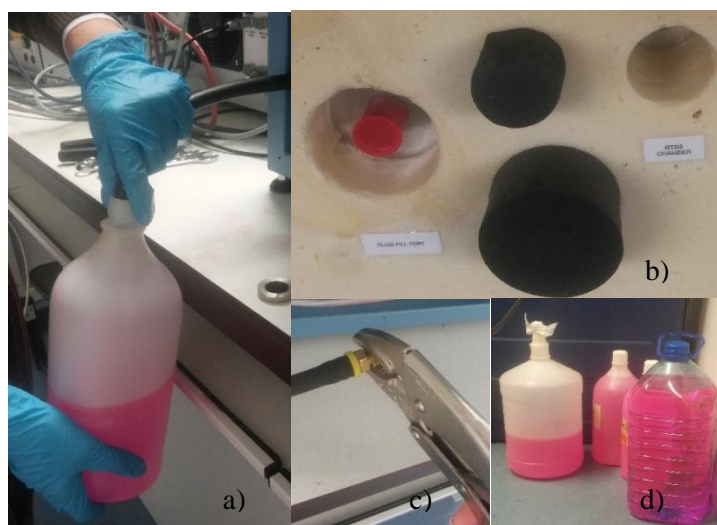


Figura 5.5 - Fluido de transferência. a)- Drenagem; b)-Orifício para introdução do fluido; c)- Pormenor dreno; d)- Fluido drenado

Após a remoção do fluido de transferência, são retirados os sensores de temperatura como ilustrado na figura 5.6.

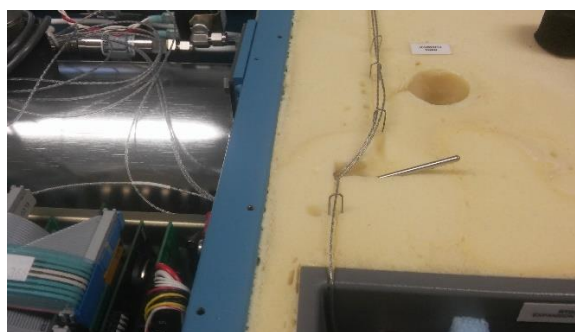


Figura 5.6 - Remoção dos sensores de temperatura

A câmara climática necessita de estar ligada para se aceder ao menu de calibração, através do painel de controlo. São realizados 5 ensaios para 5 valores de temperatura.

No *software* apenas serão introduzidos 3 valores de temperatura: 0 °C, 35 °C e 70 °C correspondendo respectivamente aos parâmetros indicativos LOW, MID e HIGH apresentados no painel de controle [27].

Para a realização do primeiro ensaio que corresponde ao valor de temperatura de 0 °C, os quatro sensores são introduzidos junto do padrão, no ponto de gelo. Note-se que os equipamentos foram previamente ligados. Após se verificar a estabilização dos valores, é introduzido, no painel de controle, o valor medido pelo padrão e registado o valor da contagem apresentada.

Seguidamente, os quatro sensores, juntamente com o padrão, são introduzidos no banho termorregulado para a temperatura de 20 °C. O valor medido pelo padrão é registado manualmente assim como o valor da contagem. Os ensaios referentes às temperaturas de 20 °C e 50 °C são meramente indicativos neste processo funcionando como critério de aceitação dos coeficientes calculados após calibração e elaboração do cálculo das incertezas associadas aos respetivos sensores.

Para as temperaturas de 35 °C e 70 °C os valores medidos pelo padrão são introduzidos no sistema através do painel de controle como ilustrado na figura 5.7.

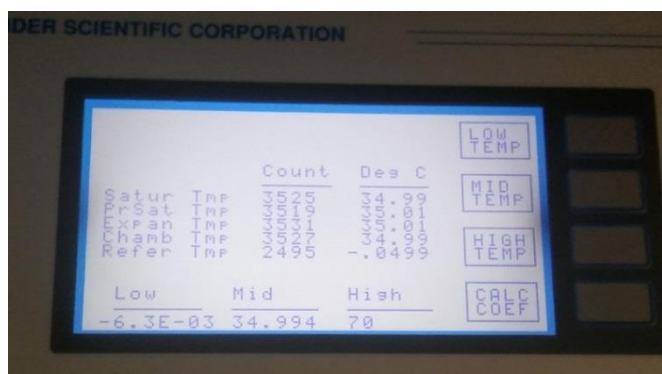


Figura 5.7 - Painel de controle

Após a introdução dos valores para as três temperaturas, são gerados novos coeficientes para cada um dos sensores correspondendo aos parâmetros *lin*, *span* e *zero* da equação (5.1) [27]:

$$y = \text{lin}x_c^2 + \text{span}x_c + \text{zero} \quad (5.1)$$

Onde:

y - valor duma mensuranda (temperatura ou pressão)

x_c - valor da contagem A/D

O valor dos coeficientes *lin*, *span* e *zero* são calculados automaticamente pelo sistema com os valores de contagem e temperatura provenientes dos ensaios.

De seguida, exemplifica-se o cálculo realizado para os valores dos coeficientes para o sensor RTD0.

$$\begin{cases} T_{LOW} = \text{lin}(\text{contagem LOW})^2 + \text{span}(\text{contagem LOW}) + \text{zero} \\ T_{MID} = \text{lin}(\text{contagem MID})^2 + \text{span}(\text{contagem MID}) + \text{zero} \\ T_{HIGH} = \text{lin}(\text{contagem HIGH})^2 + \text{span}(\text{contagem HIGH}) + \text{zero} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \text{lin} = 6,69229 \times 10^{-9} \\ \text{span} = 9,88324 \times 10^{-3} \\ \text{zero} = 0,0194346 \end{cases}$$

Os resultados dos valores dos coeficientes calculados pela câmara, para os quatro sensores, encontram-se no capítulo “*Análise de Resultados*”.

5.1.1.2. Avaliação da Incerteza de Medição

Com a calibração dos sensores de temperatura da câmara climática pretende-se obter a incerteza de medição associada a cada sensor, para posterior cálculo da incerteza da câmara, em humidade relativa. Assim, uma avaliação de incerteza para cada um dos quatro sensores é necessária.

O modelo utilizado para o cálculo da incerteza é o seguinte:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) = u_{a1}^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2 + u_{b4}^2 + u_{b5}^2 + u_{b6}^2 \quad (5.2)$$

Onde:

u_{a1} - Repetibilidade

u_{b1} - Calibração do padrão smt15

u_{b2} - Estabilidade do padrão smt15

u_{b3} - Resolução da ponte F17

u_{b4} - Estabilidade do banho termorregulado

u_{b5} - Uniformidade do banho termorregulado

u_{b6} - Resolução da unidade de leitura

Na tabela 5.1 ilustram-se as fontes de incerteza consideradas na avaliação da incerteza de medição dos sensores de temperatura.

Tabela 5.1 - Contribuições de incerteza dos sensores de temperatura

Contribuição para incerteza	Descrição	Tipo	Distribuição de Probabilidade	C _i	Divisor
u_{a1}	Repetibilidade	A	Normal	1	1
u_{b1}	Incerteza PRT-25	B	Normal	1	2
u_{b2}	Estabilidade PRT-25	B	Retangular	1	$\sqrt{3}$
u_{b3}	Resolução Ponte F17	B	Combinada	10	1
u_{b4}	Estabilidade Banho HS	B	Normal	1	1
u_{b5}	Uniformidade Banho HS	B	Retangular	1	$\sqrt{3}$
u_{b6}	Resolução Unidade Leitura	B	Retangular	1	$\sqrt{12}$

A componente, u_{a1} , é obtida pelo desvio-padrão experimental da média através da equação (4.11).

A componente, u_{b1} , é dada pelo valor de incerteza presente no certificado de calibração do padrão (equação (4.12)).

A componente, u_{b2} , provém das especificações do instrumento padrão.

A componente, u_{b3} , é a componente de incerteza devido à resolução da ponte de resistências F17. A incerteza associada à razão medida é dada pelas especificações do fabricante e corresponde ± 0.4 ppm. Com base no procedimento PT 5010001514-04 [33], o desvio padrão relativo à razão medida é dado por:

$$s_{\text{razão}} = \frac{2a}{\sqrt{12}} = \frac{0,4 \times 10^{-8}}{\sqrt{3}} \times R_t = 2,3 \times 10^{-9} \times R_t \quad (5.3)$$

Onde:

$s_{\text{razão}}$ - desvio-padrão

a - exatidão pelo limite superior do erro

R_t - resistência medida pelo termómetro

Assim para se obter a componente de incerteza, u_{b3} , é necessário recorrer a uma distribuição de probabilidade combinada que corresponderá à soma das variâncias das contribuições da razão medida.

A variância devido à exatidão da razão é dada pelo quadrado da equação (5.23). A componente u_{b3} , é obtida, então [33]:

$$u_{b3} = \frac{s_{\text{razão}}^2 \times R_t}{1} \times C_i \quad (5.4)$$

Como valor medido de resistência é dado em ohms e a incerteza em graus celsius é necessário recorrer a um coeficiente de sensibilidade que relacione as duas grandezas.

Da curva de calibração de um termómetro de resistência de platina de 25 Ω sabe-se que, uma variação de 1 Ω corresponde a uma variação de 10 $^{\circ}\text{C}$ então o coeficiente de sensibilidade é igual a 10 [33].

A componente, u_{b4} , relativa à estabilidade do banho termorregulado é calculada pelo desvio-padrão dos valores medidos pelo termómetro.

As componentes u_{b5} e u_{b6} são obtidas através de dados fornecidos pelo fabricante dos equipamentos.

No capítulo “*Análise de Resultados*” exhibe-se de forma mais detalhada os resultados da avaliação da incerteza de medição dos sensores de temperatura.

5.1.2. Calibração dos Sensores de Pressão

Como já foi referido a câmara possui dois transdutores de pressão que operam em dois intervalos e, portanto, a calibração de cada um deles é efetuada para dois patamares de pressão: alta e baixa. Para tal é necessário recorrer a um padrão de pressão que opere nos seguintes intervalos: Pressão atmosférica a 344,73785 kPa e 344,73785 kPa a 1034,21355 kPa, respetivamente [27].

Na figura 5.8 ilustra-se o instrumento padrão utilizado durante a calibração. Este equipamento é da marca WIKA, modelo CPC 8000 com uma resolução de 0,0001 bar.



Figura 5.8 - Equipamento padrão de pressão

O método baseia-se no controlo e medição de patamares de pressão absoluta através de um instrumento de referência. A pressão é fornecida à câmara por meio de um reservatório de azoto pressurizado [27].

O transdutor T2 que corresponde a baixa pressão é calibrado para três valores de pressão: atmosférica, 30 psia, 50 psia. O transdutor T3 é calibrado para os valores de 50 psia, 100 psia e 150 psia que correspondem a alta pressão.

O acesso aos transdutores de pressão é realizado pela parte superior direita após a remoção do respetivo painel.

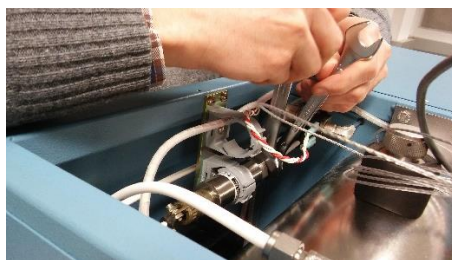


Figura 5.9 - Remoção dos transdutores de pressão

Tal como na calibração dos sensores de temperatura, durante esta operação o compressor permanece desligado e válvula na posição vertical de forma a manter aberto o sistema de pressão [27]. Contrariamente à temperatura, em que se calibram os quatro sensores simultaneamente, na pressão apenas é possível calibrar um sensor de cada vez. Assim, remove-se o sensor de baixa pressão, T2, e liga-se ao padrão.

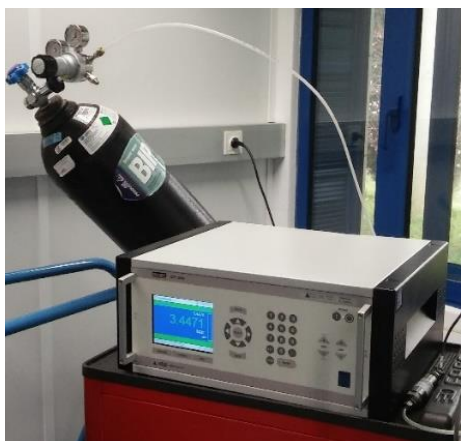


Figura 5.10 - Montagem experimental

Através do painel de controlo acede-se ao menu de calibração e selecciona-se o sensor de baixa pressão. Durante a operação a câmara permanece ligada.

Os valores medidos pelo padrão em cada patamar são introduzidos no sistema e novamente são registadas as contagens analógicas-digital. Finalizados os três patamares são gerados os novos coeficientes relativos a este sensor. O mesmo processo é repetido para o sensor T3.

No final, após gerados os coeficientes relativos ao sensor de alta pressão, são colocados novamente os sensores na câmara e aparafusado o painel superior.

O balanço de incerteza, para os dois transdutores calibrados, foi efetuado pelo domínio de pressão.

Os resultados encontram-se tabelados no capítulo “*Análise de Resultados*”.

5.1.3. Cálculo da Incerteza da Câmara Climática de Duas-Pressões

Um dos objetivos principais deste estudo prende-se com o cálculo de incerteza da câmara climática de duas-pressões recorrendo ao método descrito no GUM [14].

O modelo 2500ST da *Thunder Scientific* utiliza um modelo matemático complexo, descrito na equação (4.2), onde se obtém o valor de humidade relativa através de quatro *inputs*: pressão da câmara (P_c), temperatura da câmara (T_c), pressão de saturação (P_s) e temperatura de saturação (T_s).

No estudo da incerteza da câmara pelo método clássico, as quatro variáveis são consideradas independentes entre si [34]. Assim, realizou-se a análise da incerteza para cada uma das variáveis de modo a obter a variância de cada uma delas e, consequentemente, através da Lei da Propagação da Incerteza, a incerteza da câmara.

Nas tabelas seguintes, ilustra-se as fontes de incerteza consideradas no balanço de incerteza, para cada um dos quatro *inputs*.

Tabela 5.2 - Fontes de incerteza para temperatura de saturação

Contribuição para incerteza	Descrição	Tipo	Distribuição de Probabilidade	C_i	Divisor
u_{a1}	Repetibilidade	A	Normal	$\frac{\partial HR}{\partial T_s}$	1
u_{b1}	Incerteza RTD0	B	Normal	$\frac{\partial HR}{\partial T_s}$	2
u_{b2}	Estabilidade RTD0	B	Retangular	$\frac{\partial HR}{\partial T_s}$	$\sqrt{3}$
u_{b3}	Resolução Unidade Leitura	B	Retangular	$\frac{\partial HR}{\partial T_s}$	$\sqrt{12}$

Tabela 5.3 - Fontes de incerteza para a pressão de saturação

Contribuição para incerteza	Descrição	Tipo	Distribuição de Probabilidade	C_i	Divisor
u_{a1}	Repetibilidade	A	Normal	$\frac{\partial HR}{\partial P_s}$	1
u_{b1}	Incerteza transdutor	B	Normal	$\frac{\partial HR}{\partial P_s}$	2
u_{b2}	Estabilidade	B	Retangular	$\frac{\partial HR}{\partial P_s}$	$\sqrt{3}$
u_{b3}	Resolução Unidade Leitura	B	Retangular	$\frac{\partial HR}{\partial P_s}$	$\sqrt{12}$

Tabela 5.4 - Fontes de incerteza para a temperatura da câmara

Contribuição para incerteza	Descrição	Tipo	Distribuição de Probabilidade	C_i	Divisor
u_{a1}	Repetibilidade	A	Normal	$\frac{\partial HR}{\partial T_c}$	1
u_{b1}	Incerteza RTD3	B	Normal	$\frac{\partial HR}{\partial T_c}$	2
u_{b2}	Estabilidade RTD3	B	Retangular	$\frac{\partial HR}{\partial T_c}$	$\sqrt{3}$
u_{b3}	Resolução Unidade Leitura	B	Retangular	$\frac{\partial HR}{\partial T_c}$	$\sqrt{12}$
u_{b4}	<i>Self-heating</i>	B	Retangular	$\frac{\partial HR}{\partial T_c}$	$\sqrt{3}$

As componentes da incerteza relativas a u_{a1} , u_{b1} , u_{b2} e u_{b3} , já se encontram descritas neste documento. A componente, u_{b4} , diz respeito ao efeito de *self-heating* que se considera pelo facto do termómetro responsável por medir a temperatura da câmara ter sido calibrado num banho de água e ser utilizado para medir temperatura no ar. Esta componente é dada por [35]:

$$u_{b4} = 0,0005 \times T_c \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (5.5)$$

Tabela 5.5 - Fontes de incerteza para a pressão da câmara

Contribuição para incerteza	Descrição	Tipo	Distribuição de Probabilidade	C_i	Divisor
u_{a1}	Repetibilidade	A	Normal	$\frac{\partial HR}{\partial P_c}$	1
u_{b1}	Incerteza transdutor	B	Normal	$\frac{\partial HR}{\partial P_c}$	2
u_{b2}	Estabilidade	B	Retangular	$\frac{\partial HR}{\partial P_c}$	$\sqrt{3}$
u_{b3}	Resolução Unidade Leitura	B	Retangular	$\frac{\partial HR}{\partial P_c}$	$\sqrt{12}$

A grande dificuldade, no que se refere ao cálculo da incerteza da câmara segundo o GUM, prende-se com o cálculo dos coeficientes de sensibilidade que permitirão relacionar as grandezas temperatura e pressão com a grandeza humidade relativa. Como o modelo matemático que caracteriza o equipamento tem associado alguma complexidade, o cálculo dos coeficientes de sensibilidade, através das derivadas parciais em relação a cada uma das quatro variáveis, pode ser agilizado recorrendo ao método numérico.

Existem duas formas de se obter uma aproximação do valor da derivada de uma função de forma simplificada. O método mais simples, designa-se pelo método das diferenças finitas, onde a derivada de uma função f é dada por:

$$f'(x) \simeq \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (5.6)$$

Onde:

Δx - incremento que pode ter valor positivo ou negativo e que representa uma pequena alteração da variável x

Outra forma de se obter o valor de uma derivada é através do método das variáveis complexas, em que o valor da derivada parcial de primeira ordem é dado pela equação [36]:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \simeq \frac{\text{Imag} [f(x + ih)]}{h} \quad (5.7)$$

Esta equação é válida para valores de h muito pequenos, na ordem de 10^{-100} .

Contrariamente ao método das diferenças finitas, a estimativa da derivada parcial pela equação (5.7) não está sujeita a erros de subtração, pois não envolve nenhuma diferença. Para o cálculo das derivadas parciais, com vista a obter os coeficientes de sensibilidade para as quatro variáveis, utilizou-se método das variáveis complexas implementado num programa desenvolvido em *Octave*.

Como forma de validar os coeficientes de sensibilidade conseguidos por este método, obtiveram-se as expressões para derivadas parciais, relativamente aos quatro parâmetros da equação (4.2), ilustradas abaixo.

$$\frac{\partial HR}{\partial T_s} = \frac{RH}{f_w(P_s, T_s) \times e_w(T_s)} \left[e_w(T_s) \times \frac{\partial f_w(P_s, T_s)}{\partial T} + f_w(P_s, T_s) \times \frac{\partial e_w(T_s)}{\partial T} \right] \quad (5.8)$$

$$\frac{\partial HR}{\partial T_c} = \frac{-RH}{f_w(P_c, T_c) \times e_w(T_c)} \left[e_w(T_c) \times \frac{\partial f_w(P_c, T_c)}{\partial T} + f_w(P_c, T_c) \times \frac{\partial e_w(T_c)}{\partial T} \right] \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial HR}{\partial P_s} = \frac{RH}{f_w(P_s, T_s)} \left[\frac{\partial f_w(P_s, T_s)}{\partial P} - \frac{f_w(P_s, T_s)}{P_s} \right] \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial HR}{\partial P_c} = \frac{RH}{f_w(P_c, T_c)} \left[\frac{f_w(P_c, T_c)}{P_c} - \frac{\partial f_w(P_c, T_c)}{\partial P} \right] \quad (5.11)$$

Com,

$$\frac{\partial f_w}{\partial T} = \left[-\left(\frac{\alpha}{P} + \frac{P \times \beta}{e_w^2(T)} \right) \left(\frac{\partial e_w}{\partial T} \right) + \left(1 - \frac{e_w(T)}{P} \right) \frac{\partial \alpha}{\partial T} + \left(\frac{P}{e_w(T)} - 1 \right) \times \frac{\partial \beta}{\partial T} \right] \times f_w(P, T) \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial f_w}{\partial P} = \left[\frac{e_w(T) \times \alpha}{P^2} + \frac{\beta}{e_w(T)} \right] \times f_w(P, T) \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial e_w}{\partial T} = \left(\frac{-2C_0}{(T + T_0)^3} - \frac{C_1}{(T + T_0)^2} + C_3 + 2C_4(T + T_0) + \frac{D}{T + T_0} \right) e_w(T) \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial T} = A_1 + 2A_2 + 3A_3 T^2 \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial T} = (B_1 + 2B_2 T + 3B_3 T^2) \times \beta(T) \quad (5.16)$$

Estas expressões foram implementadas num programa em *Octave* e, comparou-se os resultados obtidos pelos dois métodos.

Em casos em que o modelo matemático, para cálculo de uma dada grandeza, apresenta um elevado nível de complexidade é comum recorrer-se à avaliação da incerteza de medição através do Método de Monte Carlo que, por não necessitar da introdução de coeficientes de sensibilidade, evita o cálculo das derivadas parciais.

Este método de simulação estatística recorre a sequências de números aleatórios e baseia-se na propagação das funções de probabilidade das variáveis de entrada através do modelo matemático que caracteriza a variável de saída [37].

5.1.3.1. GNU Octave

GNU Octave é uma linguagem de programação desenvolvida com vista à computação numérica. Por ser livre e compatível com linguagem Matlab, foi a linguagem escolhida para implementar os dois métodos que permitem o cálculo das derivadas parciais da expressão (4.2).

As derivadas parciais para cada variável são obtidas por patamar de humidade relativa e integram o balanço de incerteza como coeficiente de sensibilidade.

Os dados utilizados na comparação dos dois métodos dizem respeito à temperatura de 20 °C.

Tabela 5.6 - Coeficientes de sensibilidade obtidos pelo método das variáveis complexas

Patamar	$\frac{\partial HR}{\partial T_c}$	$\frac{\partial HR}{\partial P_c}$	$\frac{\partial HR}{\partial T_s}$	$\frac{\partial HR}{\partial P_s}$
30 %	-1,8576002	3,0234471E-04	1,8581780	-9,0353208E-05
50 %	-3,0945533	5,0458121E-04	3,0977700	-2,5369474E-04
75 %	-4,6401687	7,5669239E-04	4,6468165	-5,7347318E-04

Tabela 5.7 - Coeficientes de sensibilidade obtidos pelas expressões das derivadas parciais

Patamar	$\frac{\partial HR}{\partial T_c}$	$\frac{\partial HR}{\partial P_c}$	$\frac{\partial HR}{\partial T_s}$	$\frac{\partial HR}{\partial P_s}$
30 %	-1,8576002	3,0234471E-04	1,8581780	-9,0353208E-05
50 %	-3,0945533	5,0458121E-04	3,0977700	-2,5369474E-04
75 %	-4,6401687	7,5669239E-04	4,6468165	-5,7347318E-04

Analisando as tabelas tabela 5.6 e tabela 5.7 verifica-se que, os coeficientes de sensibilidade obtidos pelas expressões das derivadas parciais apresentam valores análogos aos obtidos pelo método das variáveis complexas, comprovando o programa implementado.

Como forma de validar o método de cálculo de incertezas, foram analisados dados relativos a três patamares de humidade relativa utilizando um programa em Matlab implementado com o Método de Monte Carlo. Esta programa foi cordialmente disponibilizado, apenas para confirmação do método desenvolvido para este estudo.

Na tabela 5.8, é possível visualizar-se os valores obtidos para a incerteza de medição associada aos três patamares de humidade utilizando o Método de Monte Carlo, em Matlab, e utilizando o GUM com os coeficientes de sensibilidade calculados com recurso ao Octave.

Tabela 5.8 - Valores de incerteza expandida pelo GUM e pelo Método de Monte Carlo

HR	Método Monte Carlo	GUM
30 %	0,21	0,19
50 %	0,30	0,30
70 %	0,43	0,43

Note-se que se verifica uma pequena diferença do valor de incerteza expandida para uma humidade relativa de 30 %, que poderia ser explicada pelo facto do GUM não ter em consideração a não linearidade do modelo matemático em causa, contrariamente ao outro método analisado, porém não se verificam diferenças para os outros patamares. Ainda assim, os resultados obtidos pelos dois métodos são muito similares pelo que o cálculo da incerteza segundo o GUM provém uma boa estimativa do valor real.

Como forma de validar os valores de humidade relativa calculados pelo *software ControLogTM*, desenvolveu-se, ainda, um programa com recurso à mesma linguagem que realiza o cálculo de humidade relativa com base na equação (4.2). Este programa calcula, através das constantes da ITS-90, todos os *inputs* da equação, isto é, com base nos valores disponibilizados pela câmara para a temperatura e pressão da câmara e do saturador é efetuado o cálculo para os fatores de melhoramento e graus efetivos de saturação. Consequentemente, obtêm-se o valor de humidade relativa.

Realizou-se esta análise para três patamares de humidade relativa: 30 %, 50 % e 75 % a 20 °C, utilizando uma amostragem de 10 medições para cada patamar. Para cada valor obteve-se o erro, assumindo como valor de referência o valor calculado pela equação (4.2).

A média dos valores calculados pela câmara ($\overline{RH@PcTc}$) e pelo programa (\overline{HR}) assim como do erro ($\bar{\epsilon}$) encontram-se na tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Médias e erro da câmara

HR = 30 %			HR = 50 %			HR = 75 %		
$\overline{RH@PcTc}$	\overline{HR}	$\bar{\epsilon}$	$\overline{RH@PcTc}$	\overline{HR}	$\bar{\epsilon}$	$\overline{RH@PcTc}$	\overline{HR}	$\bar{\epsilon}$
30,0037	30,0128	-0,0091	49,9898	49,9954	-0,0056	75,0040	75,0062	-0,0022

Ao calcular os valores de humidade relativa pelos dois métodos verifica-se que o erro obtido não é significativo confirmando a confiabilidade nos resultados obtidos pelo *software* da câmara.

No anexo XII apresenta-se o código desenvolvido.

5.2. Estudo de Uniformidade e Estabilidade de Temperatura

De forma a avaliar flutuações de temperatura na área de trabalho da câmara climática realizou-se um estudo que pretende analisar a uniformidade e a estabilidade da temperatura no seu interior.

A avaliação do perfil de temperatura é de extrema importância neste tipo de equipamento, pois as variações de temperatura verificadas contribuem como fonte de incerteza para os instrumentos a calibrar. Para além disso, o conhecimento deste tipo de perfil é de grande utilidade em casos de implementação de novos procedimentos, pois permite avaliar se o equipamento é adequado para a utilização pretendida.

Ao realizar uma análise de estabilidade, está-se a avaliar o comportamento da temperatura na câmara ao longo do tempo, ou seja, a capacidade que esta tem em manter a mesma temperatura no decorrer de um espaço de tempo. O estudo da uniformidade pretende compreender a variação de temperatura que existe dentro do espaço de trabalho da câmara [38].

A metodologia aplicada na execução deste estudo teve por base o guia Relacre 19 presente na referência [38].

Considerando que o volume útil da câmara é de, aproximadamente, 44,27 dm³ e o laboratório de temperatura apenas tem quatro termómetros de resistência de platina de 100 Ω com dimensões compatíveis com a câmara, decidiu-se realizar dois ensaios por forma a cobrir os 8 vértices da câmara. Idealmente, seria realizar um ensaio com 8 termómetros nos 8 vértices.

Antes de realizar o estudo de estabilidade e uniformidade foi necessário calibrar os quatro termómetros para os mesmos valores de temperatura dos utilizados para o estudo.

5.2.1. Calibração dos Termómetros de Resistência de Platina de 100 Ω

A calibração dos termómetros é realizada por comparação com o termómetro padrão num banho termorregulado.

Os quatro termómetros ilustrados na figura 5.11 foram calibrados para as mesmas temperaturas que os termómetros integrantes da câmara climática: 0 °C, 20 °C, 35 °C, 50 °C e 70 °C.



Figura 5.11- Termómetros de resistência de platina

Os termómetros utilizados foram termómetros de resistência de platina de 100 Ω (PRT-100). Este tipo de instrumento é constituído por várias resistências de platina que variam de forma linear com a temperatura para pequenas variações desta grandeza.

A lei da variação da resistência linearizada é dada por [39]:

$$R(t + \Delta t) = R(t) \times (1 + \alpha_R \times \Delta t) \quad (5.17)$$

Onde:

$R(t)$ - valor de resistência a uma dada temperatura t

Δt - variação de temperatura

α_R - coeficiente de temperatura da resistência ($\approx 3,9 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para platina a $0 \text{ }^\circ\text{C}$)

Os PRT-100 são muito utilizados no controlo de processos industriais e devido à sua elevada exatidão são utilizados como instrumentos metrológicos em laboratórios primários.

Para a realização da calibração recorreu-se aos equipamentos descritos no subcapítulo 4.2, nomeadamente, o termómetro padrão, o ponto de gelo, para realizar o ensaio a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ e o banho termorregulado, para a realização dos restantes pontos de calibração.

Os termómetros de resistência de platina necessitam de estar conectados a uma unidade de leitura assim, utilizou-se uma ponte de resistências que funciona conjuntamente com uma *switch box*, que possui vários canais, permitindo obter valores de resistência e temperatura dos quatro PRT simultaneamente.

A ponte de resistências utilizada é da marca ASL, modelo F250 RH, número de série 12740018 com uma resolução de $0,001 \text{ } \Omega$ (figura 5.12).



Figura 5.12 - Ponte de resistências F-250RH

Ao canal 0, da ponte, ligou-se o termómetro número 501.21- LTE EST1 A, ao canal 1 foi conectado o termómetro 501.21-LTE EST2 P que, na figura 5.11, correspondem aos PRT's de menor comprimento. Aos canais 2 e 3 foram ligados, respetivamente, o termómetro 501.21-G1446A 12 e o termómetro 501.21-G144GA 13.

As temperaturas de ensaio são medidas de forma ascendente, neste caso, desde os $0 \text{ }^\circ\text{C}$ até aos $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Os PRT's são imersos verticalmente no banho, juntamente com o termómetro padrão e mantidos no local até que a temperatura estabilize. A profundidade de imersão deve ser tal que assegure a mínima perda de calor por condução.

Para o ensaio a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, introduziram-se os quatro sensores juntamente com o padrão no ponto de gelo. Quando se verificou a estabilidade dos valores, registaram-se 20 valores para cada PRT e para o padrão.

Para as restantes temperaturas utilizou-se o banho de água como meio termorregulado e o mesmo procedimento.

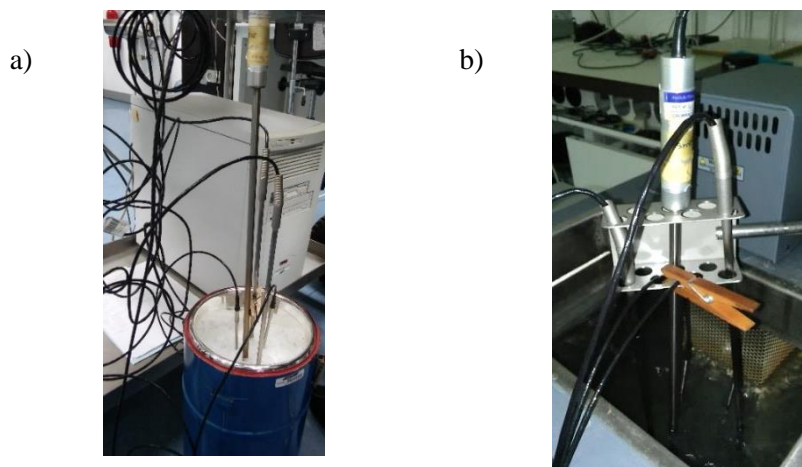


Figura 5.13 - Calibração PRT-100. a) Ponto de gelo; b) Banho de água

Os dados obtidos pelo padrão dão-nos para cada patamar a resistência medida em Ω assim como a temperatura em $^{\circ}\text{C}$. Os dados adquiridos pelos termómetros correspondem aos valores de resistência para cada canal e para cada ensaio.

Para cada sensor de temperatura é elaborado um certificado de calibração onde constam os valores verdadeiros medidos pelo padrão em $^{\circ}\text{C}$ e os valores de indicação do termómetro em Ω .

Selecionam-se do ficheiro de dados do padrão e do instrumento a calibrar 10 valores onde se verificam uma maior estabilidade. A média dos valores indicados pelo padrão em temperatura representa o valor verdadeiro. A média dos valores do termómetro irá corresponder ao valor de indicação.

O modelo matemático utilizado para o cálculo da incerteza associada a cada termómetro é dado por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) = u_{a1}^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2 + u_{b4}^2 + u_{b5}^2 + u_{b6}^2 \quad (5.18)$$

Na tabela 5.10 encontram-se especificadas as contribuições consideradas.

Tabela 5.10 - Contribuições para a incerteza dos PRT's -100

Contribuição para incerteza	Descrição	Tipo	Distribuição de Probabilidade	C_i	Divisor
u_{a1}	Repetibilidade	A	Normal	2,56	1
u_{b1}	Incerteza PRT-25	B	Normal	1	2
u_{b2}	Estabilidade PRT-25	B	Retangular	1	$\sqrt{3}$
u_{b3}	Resolução Ponte F17	B	Combinada	10	1
u_{b4}	Estabilidade Banho HS	B	Normal	1	1
u_{b5}	Uniformidade Banho HS	B	Retangular	1	$\sqrt{3}$
u_{b6}	Resolução Unidade Leitura	B	Retangular	1	$\sqrt{12}$

Na secção 5.1.1, explicitam-se as contribuições consideradas para o cálculo da incerteza associada aos sensores de temperatura da câmara climática. Nesta calibração, as contribuições consideradas são as mesmas, visto utilizar-se o mesmo equipamento padrão e meio termorregulado. A única diferença reside no facto destes termómetros de resistência de platina serem calibrados em resistência, logo, o valor correspondente à componente de incerteza, u_{d1} , é dado em ohms. Assim, torna-se necessário o cálculo de um coeficiente de sensibilidade que permite obter o valor desta contribuição em °C. Esse coeficiente de sensibilidade é calculado através da interpolação de valores tabelados presentes na norma EN 60751 [32], para os valores de temperatura medidos.

No anexo VII encontra-se um exemplo da folha de cálculo utilizada para o cálculo da incerteza expandida.

A ponte de resistências utilizada permite a introdução de coeficientes que, ao utilizar os termómetros calibrados, corrige o valor destes instrumentos em temperatura, através de uma tabela de interpolação que a própria ponte calcula.

O cálculo dos coeficientes a introduzir na ponte realiza-se através de um ajuste polinomial de grau 2. Este ajuste é feito utilizando os valores de temperatura medidos pelo padrão e a razão entre a resistência medida e a resistência à temperatura de 0 °C.

Na tabela 5.11 exemplificam-se os dados obtidos para o termómetro 501.21- LTE EST1 A, onde a coluna da esquerda indica os valores medidos pelo padrão e à direita, os valores em resistência indicados pelo termómetro. Como se pode verificar para 0 °C o valor medido pelo padrão não é exatamente igual a 0 °C, assim para fazer o ajuste polinomial, é necessário calcular o valor de R_0 através de uma interpolação entre o valor -0,0143 °C e 20,1289 °C.

Tabela 5.11 - Exemplo de cálculo de R_0

T (°C)	R_t (Ω)
-0,0143	100,012
20,1289	107,861
35,0286	113,641
50,2650	119,521
70,12236	127,145
ΔT	ΔR
20,143	7,8495
-0,014	-0,006
R_0	100,0171

Os coeficientes A, B e R_0 a introduzir são retirados da equação de ajuste que é do tipo:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (5.19)$$

Os coeficientes A e B são dados diretamente pelo valor a e b da equação. O coeficiente designado por R_0 , é calculado pela curva de ajuste, multiplicando o valor de c pelo valor de R_0 obtido pela interpolação.

A ponte de resistências disponibiliza seis modos de cálculo da tabela de interpolação para correção dos valores medidos.

Neste caso, utilizou-se o modo 2, que realiza a tabela de interpolação pela equação de *Callendar Van Dusen*, que relaciona resistência com temperatura e corresponde à equação (4.8).

A introdução dos coeficientes na ponte segundo este modo segue os passos seguintes:

1. r_0 ? - Introdução do valor de resistência para 0 °C
2. “r Lo?” - Valor mínimo da resistência, neste caso introduz-se o valor para resistência a 0°C
3. “r hi?” - Valor máximo da resistência, isto é, valor de resistência para os 70 °C
4. Ap EE - Temperatura positiva, expoente do coeficiente A, por exemplo, se $A=5,3 \times 10^{-3}$ introduzir -3
5. Ap diG - Temperatura positiva, dígitos do coeficiente A, por exemplo se $A=5,3 \times 10^3$, introduzir 5.3 se $-5,3$, então introduzir -5.3
6. Bp EE - Temperatura positiva, expoente do coeficiente B. A introdução dos dados é feita do mesmo modo
7. Bp diG - Temperatura positiva, dígitos do coeficiente B, introduzir do mesmo modo

Após a introdução dos coeficientes, o valor medido pela ponte em temperatura passa a estar corrigido pela calibração realizada.

Em anexo, é possível consultar um exemplo de certificado de calibração emitido, assim como, a folha de cálculo utilizada para determinar os coeficientes a introduzir na ponte.

5.2.2. Metodologia

O estudo de estabilidade e uniformidade baseia-se na colocação dos quatro termómetros calibrados dispostos num determinado volume e, na avaliação da variação de temperatura nesse mesmo volume, assim, como flutuações de temperatura.

Selecionou-se um volume útil da câmara para este estudo de, aproximadamente, 28,34 dm³. O volume considerado dista 30 mm dos planos laterais, superior e inferior da câmara e 15 mm dos planos frontal e posterior.

Note-se que se considerou um volume muito similar ao volume da própria câmara, sendo que o ideal seria seleccionar um volume menor, concentrado no centro do espaço de trabalho, visto ser aí que são colocados os instrumentos a calibrar. Devido à dimensão dos termómetros utilizados utilizou-se o menor volume possível onde os termómetros ficaram localizados próximos dos cantos da câmara. (figura 5.14)

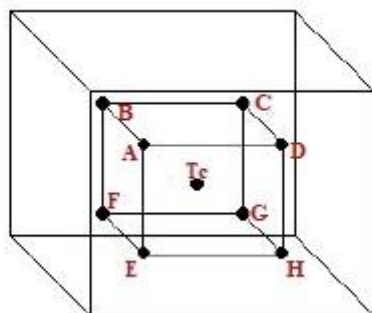


Figura 5.14 - Volume estudado no interior da câmara. Adaptado de [40]

Com o auxílio de dois suportes e garras metálicas, dispuseram-se os quatro sensores no primeiro arranjo, cobrindo os pontos A, C, F e H (figura 5.15). O sensor da câmara, RTD3, permanece no centro para os dois arranjos. De relembrar que o sensor RTD3 já foi calibrado e a sua calibração encontra-se descrita no subcapítulo 5.1.

Durante este estudo considerou-se o valor de 55 % de humidade relativa.

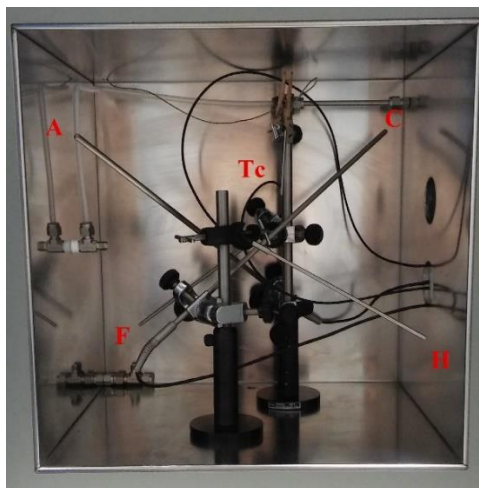


Figura 5.15 - Primeira montagem dos sensores

A temperatura dos quatro termómetros é medida pela ponte F250-RH e a câmara climática mede a temperatura do sensor RTD3 que se encontra no centro da montagem.

Na segunda montagem o objetivo passou por cobrir os pontos B, E, D e G dispondo-se os sensores como ilustrado na figura 5.16.

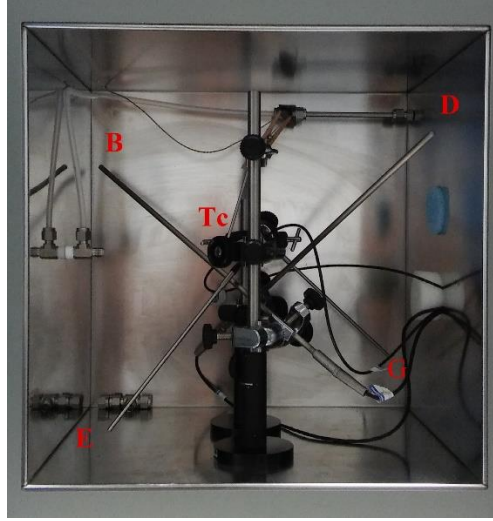


Figura 5.16 - Segunda montagem dos sensores

Com os dados obtidos dos ensaios para as duas montagens e para os valores de 20 °C, 35 °C, 50 °C e 70 °C, calculou-se a estabilidade térmica de cada sensor e, posteriormente da câmara através das expressões [38]:

$$\Delta T_{Esx} = \text{Max}(T_{sx}) - \text{Min}(T_{sx}) \quad (5.20)$$

Onde:

ΔT_{Esx} - estabilidade térmica do sensor

$\text{Max}(T_{sx})$ - valor máximo de temperatura medida pelo sensor x

$\text{Min}(T_{sx})$ - valor mínimo de temperatura medido pelo sensor x

$$\Delta T_{Es} = \text{Max}(\Delta T_{Esx}) \quad (5.21)$$

Onde:

ΔT_{Es} - estabilidade térmica da câmara

$\text{Max}(\Delta T_{Esx})$ - valor máximo de estabilidade térmica do conjunto dos sensores

A uniformidade térmica da câmara é calculada por [38]:

$$\Delta T_U = \text{Max}(\overline{T_{s1}}, \dots, \overline{T_{sn}}) - \text{Min}(\overline{T_{s1}}, \dots, \overline{T_{sn}}) \quad (5.22)$$

Onde:

ΔT_U - uniformidade térmica da câmara

$\overline{T_{sn}}$ - média dos valores de temperatura para o sensor n

O balanço de incerteza para a temperatura na câmara climática com base no estudo realizado baseia-se no mesmo modelo matemático apresentado pela equação (5.19) e apresenta-se abaixo:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) = u_{a1}^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2 + u_{b4}^2 \quad (5.23)$$

As contribuições consideradas no balanço de incerteza encontram-se descritas na tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Fontes de incerteza consideradas para o estudo de temperatura

Contribuição para incerteza	Descrição	Tipo	Distribuição de Probabilidade	C_i	Divisor
u_{a1}	Repetibilidade	A	Normal	1	1
u_{b1}	Incerteza sensor	B	Normal	1	2
u_{b2}	Estabilidade Térmica	B	Normal	1	1
u_{b3}	Uniformidade Térmica	B	Normal	1	1
u_{b4}	Resolução Unidade Leitura/2	B	Retangular	1	$\sqrt{3}$

No balanço de incerteza total, considerou-se metade do valor para a contribuição relativa à estabilidade térmica [38].

Como foram realizados dois ensaios de modo a abranger todo o volume selecionado considerou-se para a estabilidade térmica e uniformidade térmica a média dos valores obtidos para os dois ensaios.

No capítulo, “*Análise de Resultados*”, apresentam-se os resultados deste estudo de forma detalhada.

5.3. Estudo de Uniformidade e Estabilidade de Humidade

Tal como para a temperatura, realizou-se um estudo de estabilidade e uniformidade que seguiu uma metodologia similar à abordada no subcapítulo anterior, de modo a avaliar variações de humidade no interior do espaço de trabalho da câmara.

Neste estudo, foram analisados os seguintes pontos em humidade relativa: 30 %, 50 % e 70 % para uma temperatura fixa de 20 °C. Os valores de temperatura medidos pelos termohigrómetros não são relevantes para este estudo.

Recorreu-se a três termohigrómetros que se encontravam calibrados para os pontos em estudo e, que possuem um sistema de aquisição de dados automático, facilitando este processo.

Avaliaram-se duas diagonais dentro do volume de trabalho em dois ensaios distintos, mantendo o mesmo higrómetro no centro da câmara, de modo a validar as medições realizadas.

Será estudado o comportamento da mensuranda nos dois ensaios, sendo que o ideal seria realizar um ensaio único com os 5 higrómetros.

Os três higrômetros utilizados neste estudo são da marca Madgetech e possuem uma resolução de 0,1 %, em humidade relativa e 0,01 °C, em temperatura.

Tendo como referência a figura 5.17, na primeira montagem dispuseram-se os três higrômetros segundo a diagonal EC e na segunda montagem analisou-se a diagonal BH.

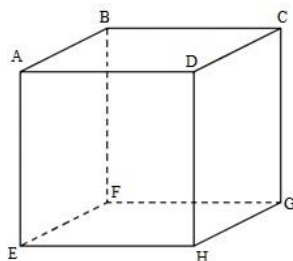


Figura 5.17 - Esquema exemplificativo do volume de trabalho da câmara

A tabela 5.13 apresenta a identificação e localização dos equipamentos no espaço de trabalho durante este estudo.

Tabela 5.13 - Identificação e localização dos higrômetros

Designação interna	Número série	Pontos estudados	Montagem
T2	Q14044	E, H	1 ^a , 2 ^a
T3	P73926	Centro	1 ^a , 2 ^a
T4	Q14551	C, B	1 ^a , 2 ^a

Nas imagens da figura 5.18 ilustram-se as duas montagens realizadas.

a)



b)



Figura 5.18 - Montagem experimental. a) 1^a Montagem; b) 2^a Montagem

Os ensaios foram realizados de forma crescente em termos de valores de humidade relativa e seleccionaram-se, para cada ponto, uma amostra de 20 valores para cada instrumento.

Os valores medidos pelos higrômetros necessitam de sofrer uma correção que é realizada por meio do certificado de calibração de cada instrumento.

Como referência, utiliza-se o valor de humidade relativa calculado pela própria câmara.

Tal como para a temperatura realizou-se o cálculo da estabilidade e da uniformidade do ambiente recorrendo às equações (5.20), (5.21) e (5.22).

Estudou-se também a estabilidade e uniformidade para cada ponto das duas diagonais de modo a avaliar o comportamento desta grandeza.

Para ponto estudado e para cada valor de humidade relativa, foram calculadas as respetivas incertezas.

A tabela 5.14 ilustra as fontes de incerteza consideradas neste estudo.

Tabela 5.14 - Fontes de incerteza consideradas para o estudo de humidade relativa

Contribuição para incerteza	Descrição	Tipo	Distribuição de Probabilidade	C_i	Divisor
u_{a1}	Repetibilidade	A	Normal	1	1
u_{b1}	Incerteza sensor	B	Normal	1	2
u_{b2}	Estabilidade	B	Normal	1	1
u_{b3}	Uniformidade	B	Normal	1	1
u_{b4}	Resolução Unidade Leitura	B	Retangular	1	$\sqrt{12}$

A incerteza do estudo corresponderá ao valor máximo de incerteza verificado para cada um dos patamares analisados.

Os resultados deste estudo podem ser consultados no capítulo 6, “*Análise de Resultados*”.

5.4. Validação da Calibração do Higrómetro

Conhecidos os resultados dos vários estudos realizados à câmara climática de duas-pressões, de modo a fundamentar a sua utilização como padrão, realizou-se uma nova calibração ao termohigrómetro calibrado no subcapítulo 4.2. Com esta calibração pretende-se realizar uma comparação, de forma indireta, com o higrómetro de ponto de orvalho por forma a validar a utilização da câmara climática como padrão.

Nesta calibração, utilizou-se a câmara climática como instrumento padrão e calibrou-se o termohigrómetro para os seguintes valores: 20 °C – 30 %, 50 % e 75 %.

O procedimento utilizado nesta calibração segue os mesmos passos do anterior, colocando-se primeiramente o termohigrómetro no interior da câmara, programando-a para os patamares de temperatura e humidade relativa solicitados.

Novamente, a aquisição de dados da câmara é realizada através do *Software ControLog* ao passo que os dados do termohigrómetro são adquiridos de forma manual através do registo de 10 valores retirados da unidade de leitura aquando do estado estacionário.

Tal como na calibração anterior, é necessário obter os valores medidos pelo padrão e pelo instrumento para as duas grandezas: temperatura e humidade relativa.

O tratamento de dados é feito de forma similar, onde a média dos 10 valores medidos pela câmara corresponde ao valor medido pelo padrão e a média dos 10 valores registados do termohigrómetro caracteriza o valor de indicação do instrumento.

O balanço da incerteza da medição é realizado para as duas mensurandas: humidade relativa e temperatura.

Para o balanço de incerteza, relativamente às grandezas temperatura e humidade relativa, considerou-se o seguinte modelo matemático:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) = u_{a1}^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2 + u_{b4}^2 \quad (5.24)$$

As fontes de incerteza consideradas no balanço das duas grandezas encontram-se na tabela 5.15, de forma genérica.

Tabela 5.15 - Fontes de incerteza consideradas na calibração do termohigrómetro

Contribuição para incerteza	Descrição	Tipo	Distribuição de Probabilidade	C_i	Divisor
u_{a1}	Repetibilidade	A	Normal	1	1
u_{b1}	Calibração da câmara	B	Normal	1	2
u_{b2}	Estabilidade	B	Normal	1	1
u_{b3}	Uniformidade	B	Normal	1	1
u_{b4}	Resolução Unidade Leitura	B	Retangular	1	$\sqrt{12}$

Para o balanço de incerteza relativo à grandeza temperatura, considerou-se o desvio-padrão da média dos valores medidos da temperatura da câmara. Consideraram-se como fontes de incerteza os valores relativos à estabilidade e uniformidade térmica obtidos do estudo descrito no subcapítulo 5.2.

Relativamente ao balanço de incerteza da grandeza humidade relativa, considerou-se a repetibilidade, como sendo o desvio-padrão da média dos valores de humidade relativa medidos pela câmara. Os valores considerados para a uniformidade e estabilidade da câmara, em humidade relativa, resultaram do estudo descrito no subcapítulo 5.3, excetuando para o valor de 75 %, pois este ponto não foi estudado. Para este valor, a estabilidade foi obtida pelo desvio-padrão dos valores da câmara e a uniformidade pela diferença entre o máximo e o mínimo dos mesmos valores.

No capítulo seguinte retratam-se os resultados obtidos para esta calibração.

6. Análise de Resultados

Neste capítulo, ilustram-se os resultados obtidos, fruto dos estudos descritos ao longo deste documento e efetua-se uma análise dos mesmos.

6.1. Resultados da Calibração da Câmara Climática

Nas próximas secções, apresentam-se os resultados alcançados no âmbito desta calibração, nomeadamente os coeficientes de correção e as incertezas relativas às grandezas estudadas.

6.1.1. Sensores de Temperatura da Câmara Climática

A calibração da câmara climática envolveu a calibração dos seus sensores de temperatura, sendo por isso, necessário realizar o balanço de incerteza para cada um dos sensores.

Para o cálculo de humidade relativa, o sistema utiliza, relativamente à grandeza temperatura, apenas os valores medidos pelos sensores RTD0 (Ts) e RTD3 (Tc). Assim, exemplifica-se, na tabela 6.1, o cálculo da incerteza para o sensor RTD0 à temperatura de 0 °C.

Tabela 6.1 - Análise da incerteza de medição para sensor RTD0, ensaio $t = 0\text{ °C}$

Grandeza	Estimativa	Incerteza-Padrão	Distribuição de Probabilidade	Divisor	C_i	Contribuição para a incerteza padrão (°C)
Repetibilidade	0,00	0,00	A- Normal	1	1	0,00
Calibração smt15	0,001	0,005	B- Normal	2	1	0,005
Estabilidade smt15	0,001	0,001	B -Retangular	$\sqrt{3}$	1	0,001
Resolução F17	25,0601	$3,80 \times 10^{-5}$	B -Combinada	1	10	$3,80 \times 10^{-4}$
Estabilidade banho	0,00	0,00	B- Normal	1	1	0,00
Uniformidade banho	0,001	$5,774 \times 10^{-4}$	B- Retangular	$\sqrt{3}$	1	$5,774 \times 10^{-4}$
Resolução unidade leitura	0,01	0,003	B- Retangular	$\sqrt{12}$	1	0,003
					u (y)	0,003 °C
					U (y)	0,01 °C

A incerteza derivada desta operação metrológica para os sensores responsáveis por medir a temperatura de saturação e da câmara encontram-se na tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Valores de incerteza para os sensores RTD0 e RTD3

Temperatura Referência (°C)	RTD0- Ts			RTD3-Tc		
	Valor Padrão (°C)	Valor Indicação (°C)	Incerteza expandida U (°C)	Valor Padrão (°C)	Valor Indicação (°C)	Incerteza expandida U (°C)
0	-0,0063	0,00	0,01	-0,0063	0,00	0,01
20	20,1740	20,16	0,01	20,1740	20,16	0,01
35	34,9938	34,99	0,01	34,9938	34,99	0,01
50	50,2587	50,26	0,01	50,2587	50,27	0,01
70	70,1958	70,22	0,01	70,1958	70,23	0,01

Para os sensores de temperatura obteve-se uma incerteza expandida de $\pm 0,01$ °C, valor que se encontra abaixo do fornecido pelo manual de utilizador do equipamento.

Aquando desta calibração, foram calculados pelo sistema da câmara, os coeficientes de correção associados a cada um dos quatro sensores. Os valores dos coeficientes obtidos encontram-se na tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Coeficientes de correção de temperatura da câmara climática de duas-pressões

Sensor	Coeficientes		
	<i>lin</i>	<i>span</i>	<i>zero</i>
RTD0	$6,69229 \times 10^{-9}$	$9,88484 \times 10^{-3}$	0,0194346
RTD1	$7,49877 \times 10^{-9}$	$9,88324 \times 10^{-3}$	0,0991465
RTD2	$7,25558 \times 10^{-9}$	$9,87744 \times 10^{-3}$	$-1,07588 \times 10^{-3}$
RTD3	$6,62082 \times 10^{-9}$	$9,89002 \times 10^{-3}$	-0,0167168

Da análise da tabela acima, verificam-se valores análogos para os valores de *lin*, *span* e *zero*, relativos aos sensores RTD0 e RTD3.

6.1.2. Sensores de Pressão

A calibração dos sensores de pressão ficou a cargo do domínio de pressão e, ilustram-se abaixo, os resultados desta calibração.

Tabela 6.4 - Resultados da calibração dos transdutores T2 e T3

T2- Baixa Pressão			T3- Alta Pressão		
Pressão Referência (psia)	Valor Padrão (bar)	Valor medido (bar)	Pressão Referência (psia)	Valor Padrão (bar)	Valor medido (bar)
atm	atm	0,9763	50	3,447	3,4479
20	1,379	1,3798	75	5,171	5,1720
30	2,068	2,0688	100	6,895	6,8962
40	2,758	2,7588	125	8,618	8,6193
50	3,447	3,4479	150	10,342	10,3445

Para o sensor de baixa pressão, obteve-se uma incerteza de 250 mbar, enquanto que para o sensor de alta pressão, o valor de incerteza obtido foi de 300 mbar.

Os valores dos coeficientes obtidos encontram-se na tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Valores dos coeficientes de correção obtidos pela câmara para T2 e T3

Transdutor	Coeficientes		
	<i>lin</i>	<i>span</i>	<i>zero</i>
T2	1,62436E-11	1,37182E-04	1,28991E-02
T3	8,01536E-11	4,09717E-04	-9,86819E-03

6.1.3. Incerteza da Câmara Climática

Para avaliar a capacidade do equipamento estudado em funcionar como padrão é necessário conhecer os resultados relativos à incerteza da câmara em humidade relativa.

Assim, apresenta-se na tabela 6.6 os valores obtidos de incerteza para três patamares de humidade relativa estudados a uma temperatura de 20 °C.

Estes valores dizem respeito ao balanço de incerteza descrito na secção 5.1.3.

Tabela 6.6 - Incerteza expandida da câmara climática para diferentes patamares de *HR*

Patamar de <i>HR</i>	Valor medido (\bar{y})	Incerteza expandida U (y)
30 %	30,00	0,09 %
50 %	49,00	0,49 %
75 %	75,00	0,26 %

Realizou-se um segundo balanço de incerteza considerando apenas como contribuição, para cada um dos parâmetros, o valor de incerteza expandida da calibração de cada sensor

A incerteza-padrão foi obtida pela raiz da soma dos quadrados dos valores da incerteza-padrão. A incerteza-padrão foi calculada pelo quociente entre o valor da incerteza expandida do sensor e o fator de expansão, multiplicado pelo coeficiente de sensibilidade.

Na tabela 6.7 ilustram os resultados.

Tabela 6.7 - Incerteza expandida para diferentes patamares de *HR*, 2º balanço

Patamar de <i>HR</i>	<i>HR</i> (\bar{y})	Incerteza expandida U (y)
30 %	30,01	0,08 %
50 %	50,01	0,15 %
75 %	74,99	0,25 %

Comparando os valores obtidos pelos dois balanços verificam-se algumas disparidades relativamente ao patamar de 50 %. O historial de calibração de instrumentos de humidade relativa mostra valores menos estáveis e menos uniformes para ensaios com $t = 20\text{ °C}$ e $HR = 50\text{ %}$. Assim sendo, as contribuições relativas à estabilidade e uniformidade não são desprezáveis, tendo que se considerar como fonte no balanço de incerteza final.

Para os restantes patamares, os valores são muito próximos podendo-se concluir que a contribuição que mais “pesa” no balanço de incerteza final é a incerteza-padrão dos próprios sensores.

6.2. Estudo de Estabilidade e Uniformidade de Temperatura

A realização de um estudo de uniformidade e estabilidade de temperatura permitiu avaliar o comportamento desta grandeza no interior da câmara.

A tabela 6.8 mostra as temperaturas médias por local de medição, assim como, a temperatura correspondente ao centro do volume de trabalho designada por Tc.

Tabela 6.8 - Valores médios de temperatura por ponto

Temperatura de Referência (°C)	Média (°C)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	Tc
20	19,91	19,90	19,90	19,82	19,91	19,91	19,87	19,84	19,92
35	34,32	34,13	34,15	34,07	33,94	34,28	34,10	34,02	34,25
50	48,95	48,73	48,72	48,70	48,42	48,88	48,74	48,51	48,86
70	68,73	68,76	68,58	68,55	68,24	68,71	68,58	68,18	68,73

Verifica-se que, a média dos valores medidos em cada ponto e por patamar, apresentam valores muito próximos do valor medido no centro do espaço de trabalho.

Nos gráficos que se seguem, apresenta-se, para cada patamar de temperatura, o resultado dos dois estudos.

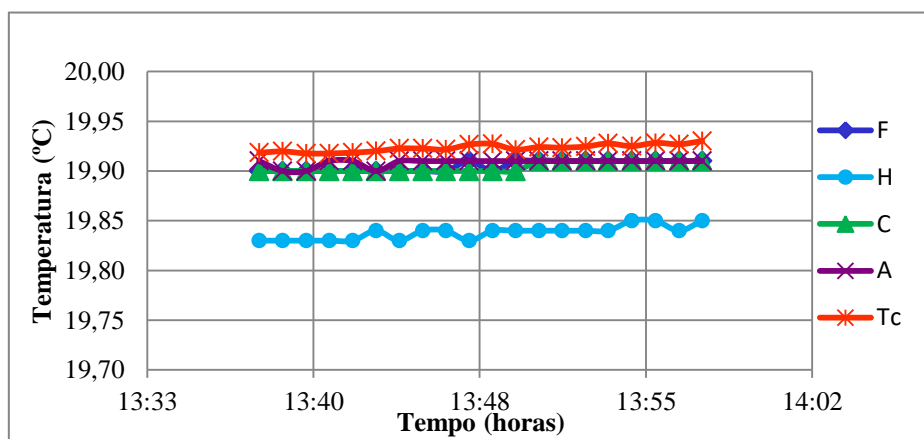


Figura 6.1 - Oscilação térmica no interior na câmara, 1º estudo, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

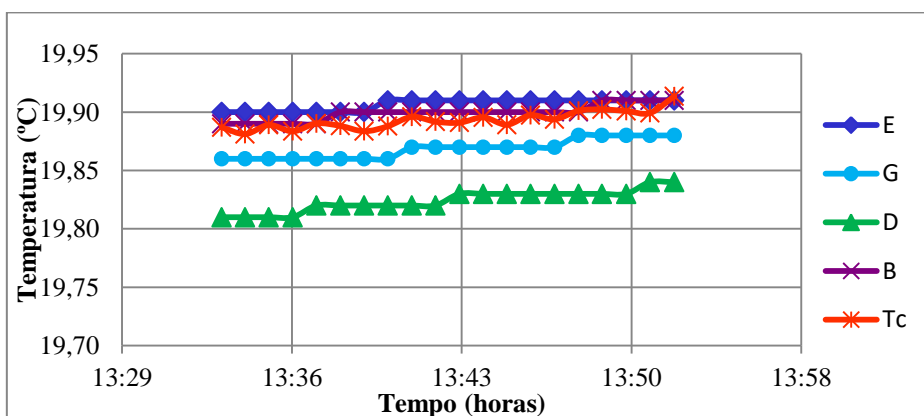


Figura 6.2 - Oscilação térmica no interior na câmara, 2º estudo, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Os gráficos apresentados ilustram o comportamento térmico do ambiente da câmara para o estado estacionário e, para cada ponto estudado em cada um dos estudos.

Em ambos os estudos, o valor referente ao sensor denominado de Tc, corresponde ao ponto central do ambiente em estudo, servindo como referência.

Analisando o comportamento da temperatura para o ensaio a 20 °C, verifica-se que tanto para os pontos avaliados na primeira montagem como para a segunda, ocorre uma repetição do comportamento térmico.

No geral, ambos os gráficos demonstram uma melhor estabilidade térmica que uniformidade evidenciada pelo idêntico comportamento das curvas de cada sensor.

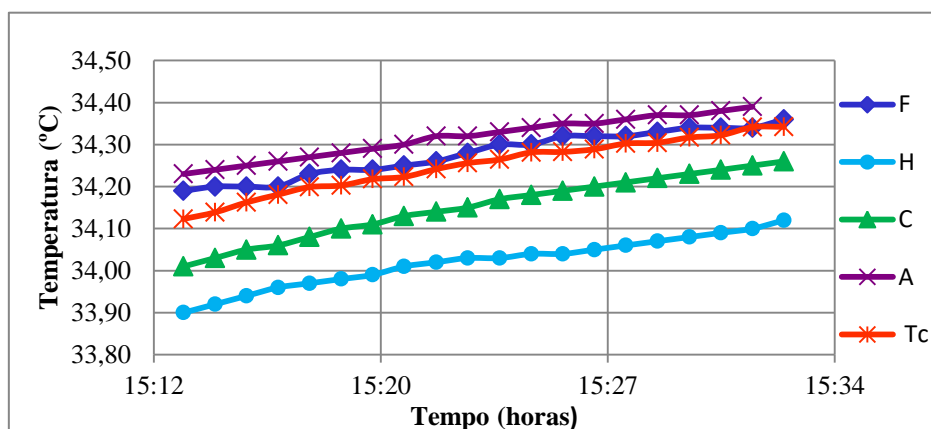


Figura 6.3 - Oscilação térmica no interior na câmara, 1º estudo, $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

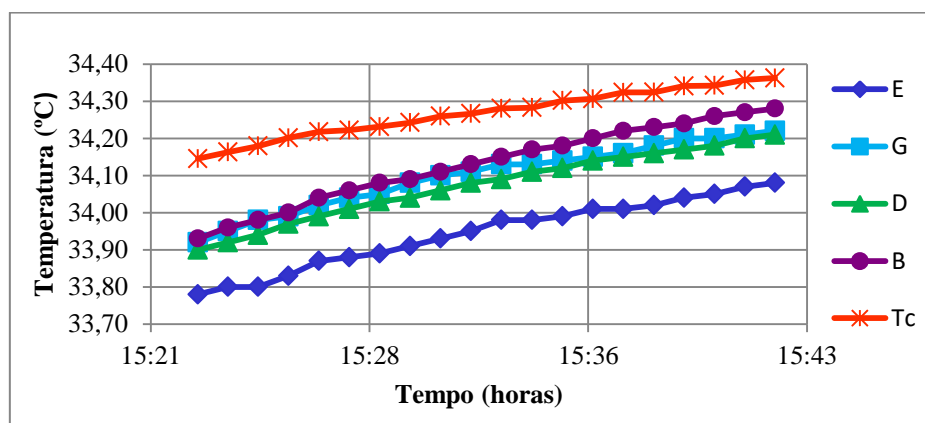


Figura 6.4 - Oscilação térmica no interior na câmara, 2º estudo, $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

Para os ensaios realizados relativos à temperatura de 35 °C, verifica-se, novamente, que o ambiente em estudo apresenta melhores resultados ao nível da estabilidade térmica que da uniformidade.

Nos gráficos seguintes apresenta-se a variação de temperatura em relação ao tempo para os ensaios relativos a $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

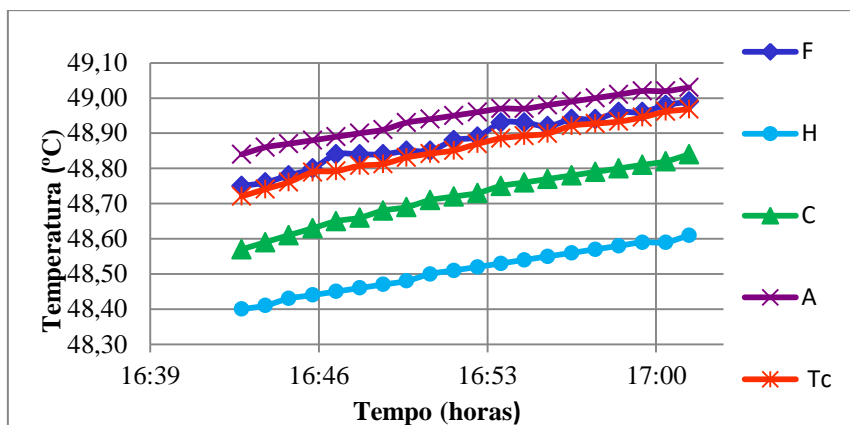


Figura 6.5 - Oscilação térmica no interior na câmara, 1º estudo, $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

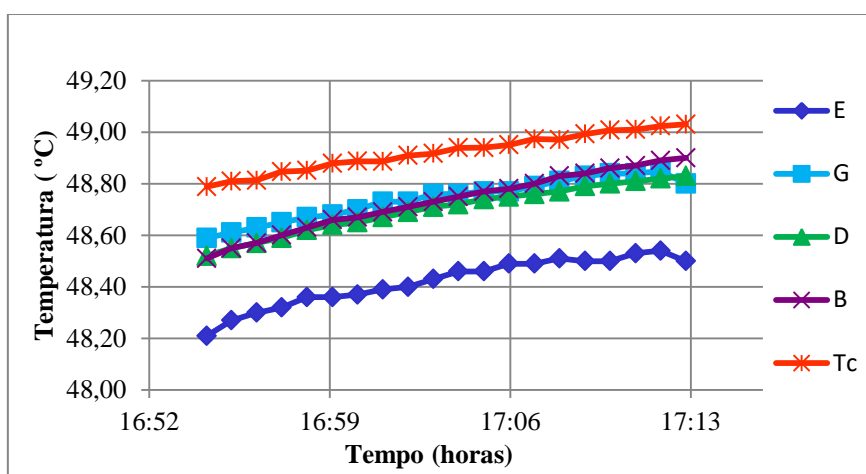


Figura 6.6 - Oscilação térmica no interior na câmara, 2º estudo, $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

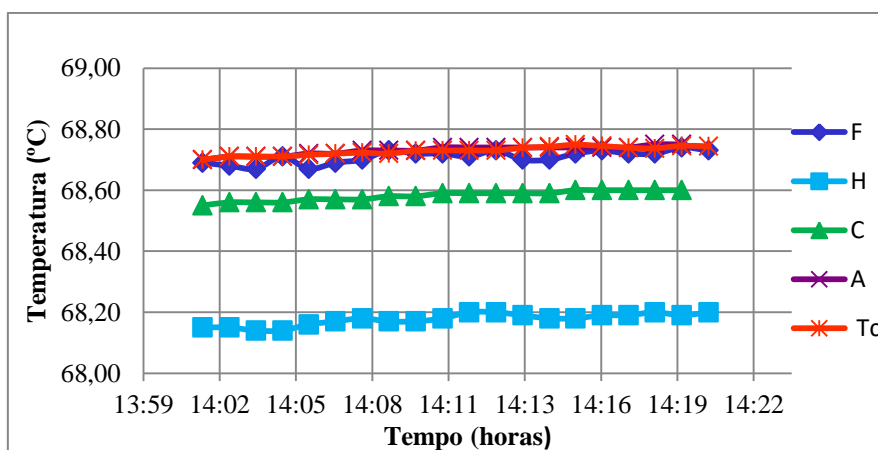


Figura 6.7 - Oscilação térmica no interior na câmara, 1º estudo, $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

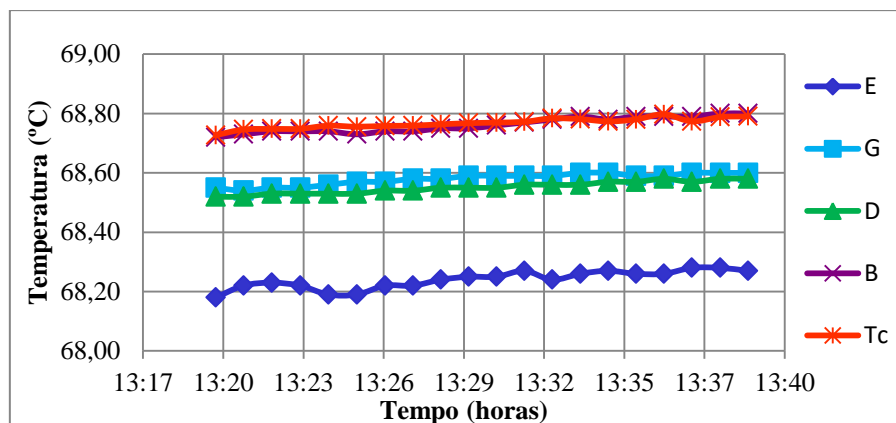


Figura 6.8 - Oscilação térmica no interior na câmara, 2º estudo, $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Para os ensaios à temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ verifica-se uma menor uniformidade nos valores, comparativamente aos ensaios anteriormente analisados.

Em relação à estabilidade térmica da câmara, esta apresenta bons resultados validando a aptidão desta em manter a sua temperatura ao longo do tempo.

Na tabela 6.9 expõem-se os valores obtidos para a uniformidade térmica da câmara.

Tabela 6.9 - Resultados da avaliação da uniformidade térmica da câmara

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Uniformidade Térmica ($^{\circ}\text{C}$)		
	1º Estudo	2º Estudo	Média
20	0,09	0,08	0,08
35	0,30	0,32	0,31
50	0,44	0,50	0,47
70	0,55	0,53	0,54

Entre as especificações fornecidas pelo fabricante relativamente ao equipamento em estudo, este indica-nos um valor para a uniformidade térmica da câmara de $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, para um intervalo de temperatura de $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, em relação à temperatura ambiente.

Assim, atendendo a que a temperatura do laboratório aquando do ensaio realizado se encontrava a $\pm 17\text{ }^{\circ}\text{C}$, o valor obtido para a uniformidade térmica para o patamar de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ encontra-se em conformidade com o esperado.

Em relação aos restantes patamares nada se pode afirmar com base nos dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 6.10 - Resultados da avaliação da estabilidade térmica da câmara

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Estabilidade Térmica ($^{\circ}\text{C}$)		
	1º Estudo	2º Estudo	Média
20	0,02	0,03	0,03
35	0,25	0,35	0,30
50	0,25	0,39	0,32
70	0,07	0,09	0,08

Observando os valores presentes na tabela 6.10, verificam-se melhores resultados a nível de estabilidade térmica para o primeiro e último patamar de temperatura, facto suportado pelas representações gráficas já apresentadas.

Realizou-se o cálculo de incerteza para cada ponto estudado e para cada patamar de temperatura.

Na tabela 6.11 ilustram-se os resultados obtidos do balanço de incerteza.

Tabela 6.11 - Valores de incerteza por ponto e patamar

Temperatura (°C)	Incerteza por ponto (°C)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	Tc
20	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
35	0,06	0,13	0,09	0,11	0,05	0,03	0,04	0,03	0,08
50	0,07	0,14	0,10	0,11	0,05	0,04	0,04	0,03	0,09
70	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02

Analisando os resultados relativos ao valor de incerteza por cada ponto, observa-se que o patamar de 20 °C apresenta os melhores resultados, com todos os pontos com igual valor de incerteza associada.

Os restantes patamares apresentam alguma variação, assim como algumas diferenças face à incerteza do sensor Tc, que se encontrava no centro da câmara.

Nas figuras que se seguem retratam-se os resultados obtidos para a média por ponto e respetiva incerteza associada, de forma representativa.

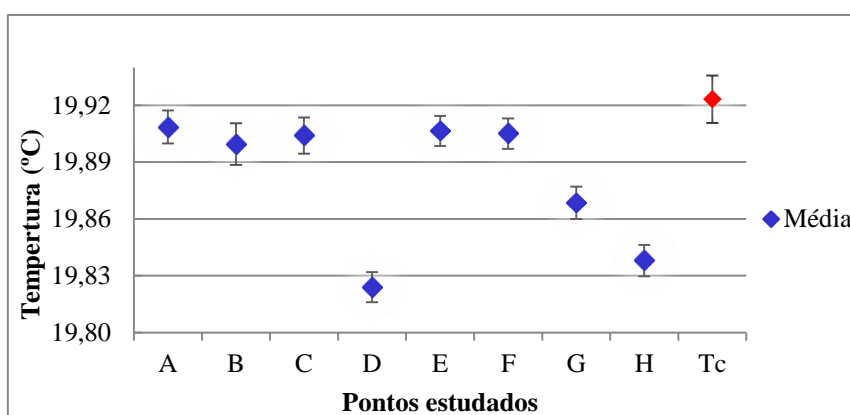


Figura 6.9 - Média e respetiva incerteza para o ensaio $t = 20\text{ °C}$

A azul, retrata-se a média de cada ponto estudado, com a respetiva incerteza calculada representada pelas barras de erro. O marcador de cor vermelha, representa a temperatura da câmara, que é tida como referência.

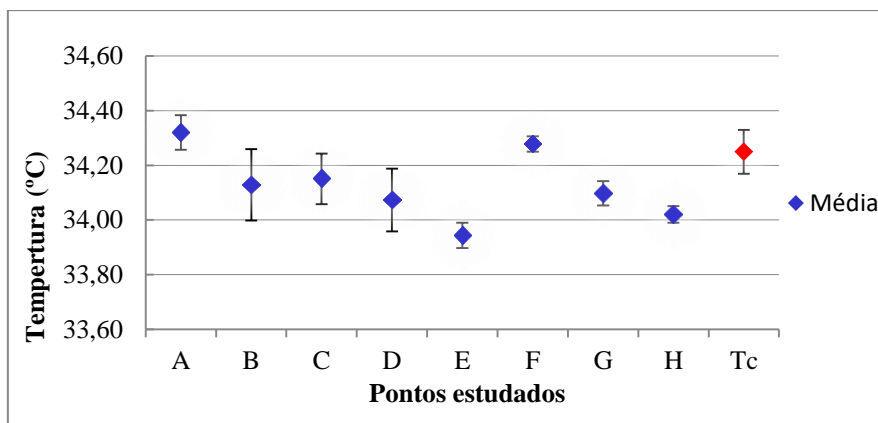


Figura 6.10 - Média e respectiva incerteza para o ensaio $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

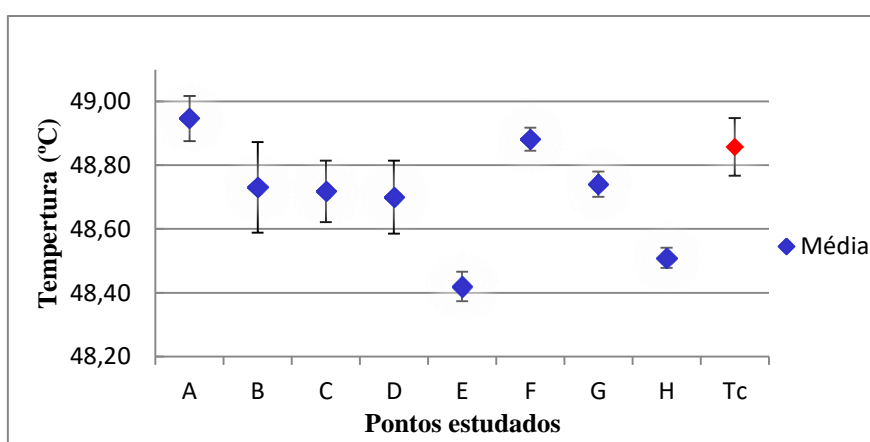


Figura 6.11 - Média e respectiva incerteza para o ensaio $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

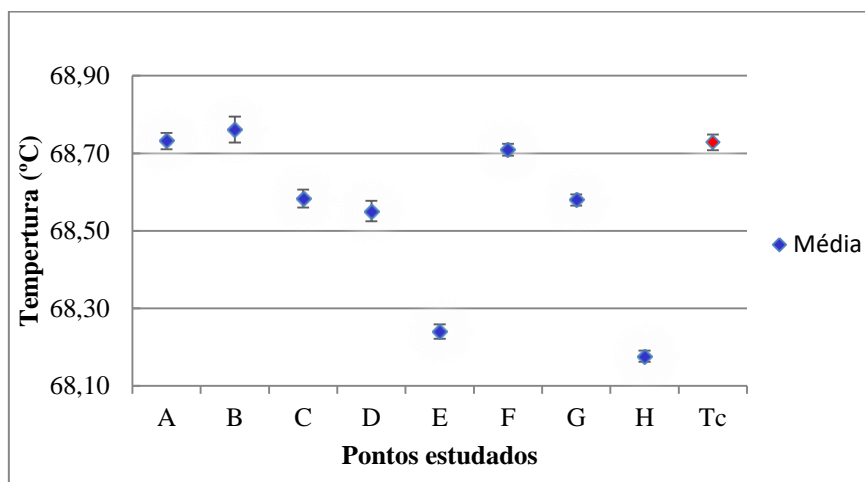


Figura 6.12 - Média e respectiva incerteza para o ensaio $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Da análise dos gráficos apresentados, assim como, dos valores constituintes da tabela 6.11, constata-se que, os patamares de temperatura iguais a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, apresentam valores de incertezas mais baixos. Para os mesmos patamares já se tinha verificado melhores resultados a nível de estabilidade e uniformidade térmica.

Tendo presente a posição de cada ponto relativamente ao volume estudado (figura 5.14), verifica-se que os pontos B e D, correspondentes aos cantos do plano superior do cubo, apresentam resultados menos satisfatórios, com incertezas mais altas

Ainda assim, os resultados obtidos encontram-se muito próximos do valor de referência.

A incerteza de medição relativa ao volume estudado para cada patamar de temperatura encontra-se na tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Valores médios e incerteza expandida para a câmara

Temperatura de Referência (°C)	Valor medido (\bar{y}) (°C)	Incerteza Expandida U (y) (°C)
20,00	19,89	0,17
35,00	34,14	0,71
50,00	48,72	0,84
70,00	68,54	1,11

Os patamares de 50 °C e 70 °C apresentam valores de incerteza em temperatura um pouco elevados comparativamente às outras duas temperaturas de referência. O ensaio para a temperatura de 50 °C foi realizado com uma humidade relativa de 55 % enquanto o patamar de 70 °C decorreu a uma humidade relativa de 50 %. Estes valores são considerados valores extremos que, por norma, não são solicitados em calibrações.

As incertezas obtidas para os outros patamares encontram-se dentro dos requisitos estabelecidos, uma vez que os instrumentos de humidade relativa calibrados pelo laboratório operam com uma exatidão máxima de ± 1 °C.

6.3. Estudo de Estabilidade e Uniformidade de Humidade

O estudo de estabilidade e uniformidade de humidade relativa contou com a realização de dois ensaios por forma a avaliar duas diagonais, mantendo no centro o higrómetro designado por T3.

Na tabela 6.13 exibem-se os resultados relativos à média dos valores medidos e corrigidos pelos instrumentos.

Tabela 6.13 - Valores médios de humidade relativa para os dois ensaios

HR (%)	RH @PcTc (%)	Média (%)					
		1º Ensaio			2º Ensaio		
		T2 E	T3	T4 C	T2 H	T3	T4 B
30	30,0	31,5	31,0	31,9	31,5	31,0	31,9
50	50,0	48,0	47,9	48,2	48,0	47,9	48,2
70	70,0	64,0	64,1	63,7	64,0	64,1	63,7

A coluna designada por “RH@PcTc” equivale à média dos valores medidos pela câmara, que servem de referência para este estudo.

Verifica-se a equivalência dos valores resultantes dos dois ensaios para o higrômetro T3, concluindo-se, assim, que o equipamento apresenta uma boa reprodutibilidade.

Para os instrumentos T2 e T4, embora tenham ocupado diferentes posições em cada ensaio, obtiveram-se resultados análogos.

Nas próximas figuras ilustra-se o comportamento da câmara, para cada patamar de humidade relativa, para os dois ensaios realizados.

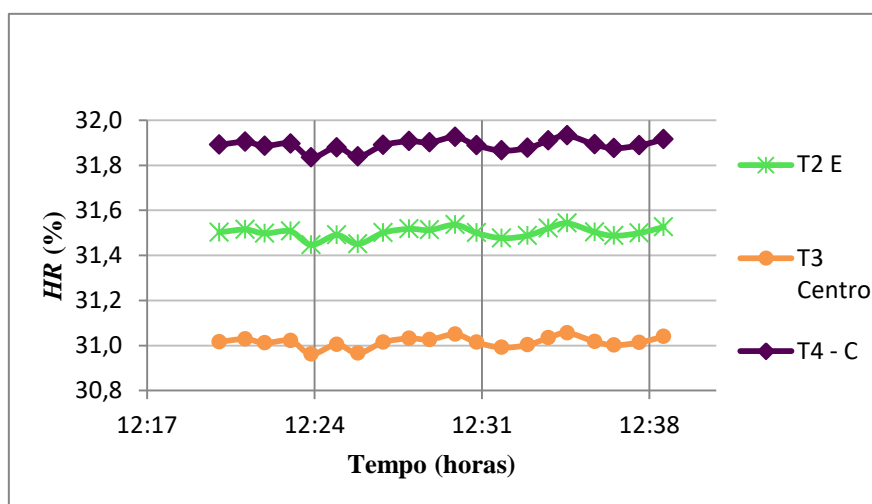


Figura 6.13 - Medições de humidade no interior da câmara, 1º ensaio, $HR = 30 \%$

As curvas retratadas nas figuras, apresentam a variação de humidade relativa ao longo do tempo, para cada ponto estudado (E, Centro, C, H e B), por cada um dos instrumentos (T2, T3, T4).

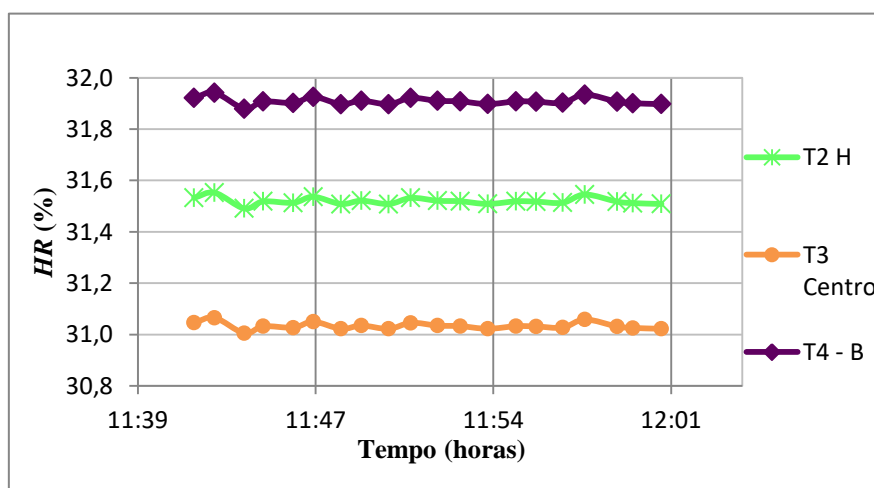


Figura 6.14 - Medições de humidade no interior da câmara, 2º ensaio, $HR = 30 \%$

Observando os gráficos para o patamar de 30 % de humidade relativa verifica-se que para ambos os ensaios o equipamento manteve o seu comportamento. Da observação das

curvas, depreende-se que a câmara apresenta melhores resultados para a estabilidade que para a uniformidade, uma vez que as curvas indicam um maior desvio espacial que temporal.

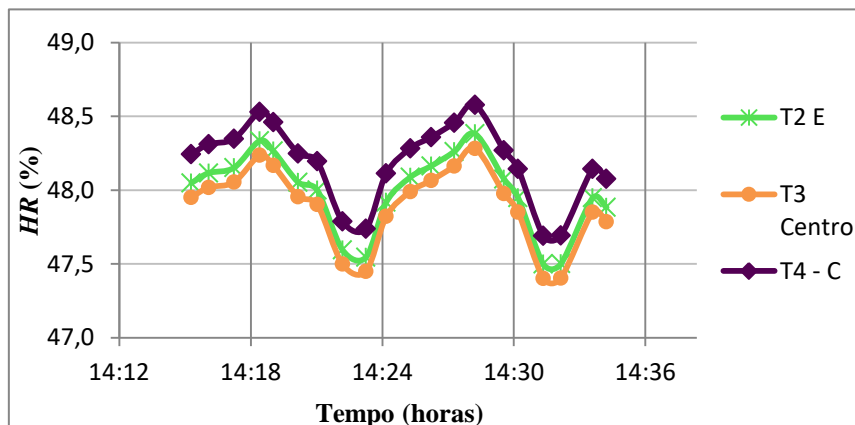


Figura 6.15 - Medições de umidade no interior da câmara, 1º ensaio, $HR = 50 \%$

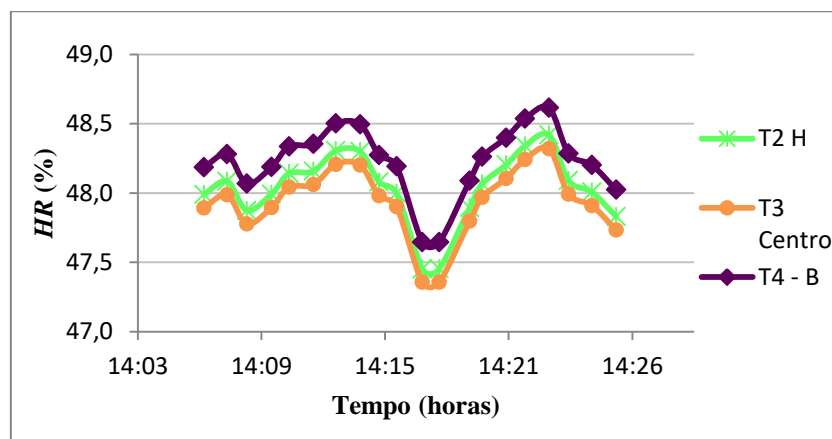


Figura 6.16 - Medições de umidade no interior da câmara, 2º ensaio, $HR = 50 \%$

As curvas relativas ao patamar de 50 %, apresentam resultados satisfatórios tanto para a estabilidade como para a uniformidade, exibindo o mesmo comportamento e menor desvio espacial.

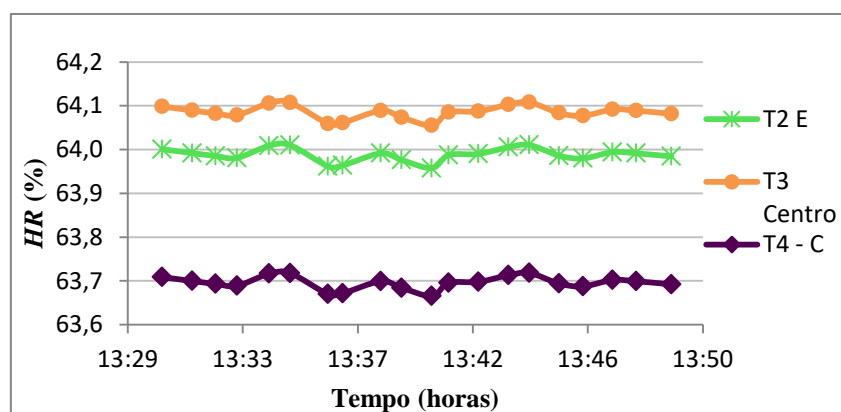


Figura 6.17 - Medições de umidade no interior da câmara, 1º ensaio, $HR = 70 \%$

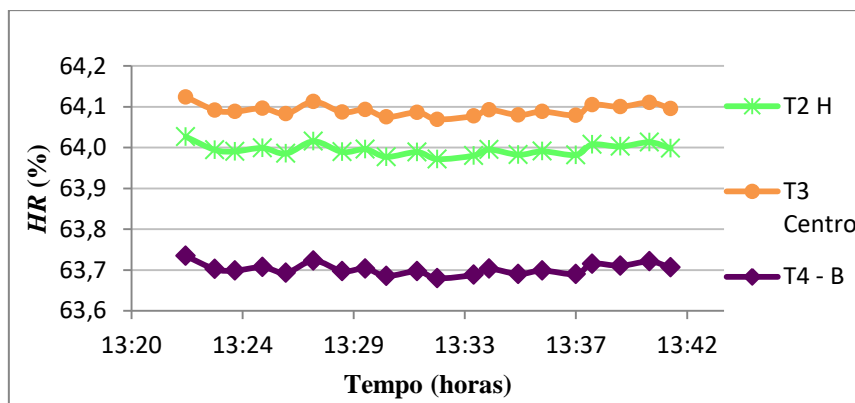


Figura 6.18 - Medições de umidade no interior da câmara, 2º ensaio, $HR = 70 \%$

As curvas obtidas dos ensaios referentes a 70% , retratam um comportamento muito semelhante ao obtido para o patamar de 30% , com uma estabilidade superior à uniformidade.

Os resultados relativos à avaliação da estabilidade e da uniformidade de umidade relativa no ambiente da câmara, encontram-se nas tabelas que se seguem.

Tabela 6.14 - Resultados da avaliação da estabilidade da câmara

$HR (\%)$	Estabilidade (%)		
	1º Ensaio	2º Ensaio	Média
30	0,10	0,06	0,08
50	0,89	0,97	0,93
70	0,05	0,05	0,05

Os valores apresentados, encontram-se majorados, pois no estudo, considerou-se um volume muito próximo do volume total da câmara.

O resultado final corresponde à média dos valores dos ensaios realizados.

Tabela 6.15 - Resultados da avaliação da uniformidade da câmara

$HR (\%)$	Uniformidade (%)		
	1º Ensaio	2º Ensaio	Média
30	0,88	0,88	0,88
50	0,29	0,29	0,29
70	0,39	0,39	0,39

Do balanço de incerteza, para cada patamar, resultaram os gráficos que surgem nas próximas figuras.

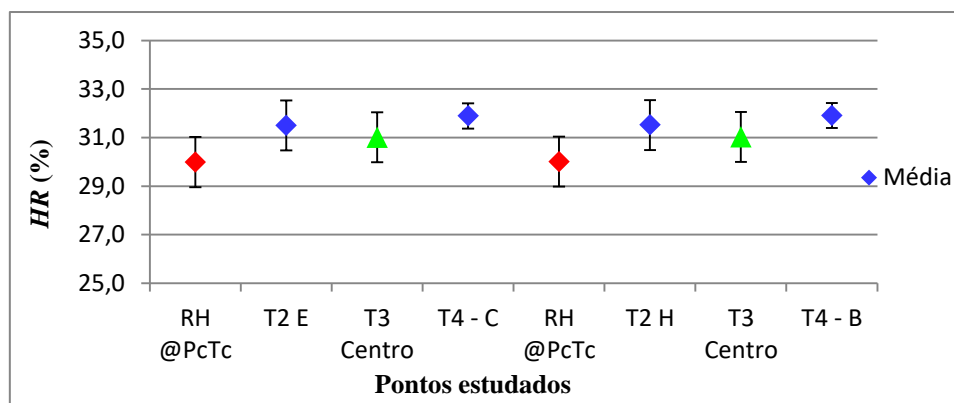


Figura 6.19 - Média e incerteza, $HR = 30 \%$

A vermelho, salienta-se o valor de referência obtido pela câmara climática. Note-se que o valor se mantém para os dois ensaios.

A verde, destacam-se os pontos relativos ao higrómetro T3 que manteve a posição para os dois ensaios. A azul, indica-se o valor médio para os higrómetros T2 e T4, com as respetivas barras de erros a representar a incerteza associada a cada ponto.

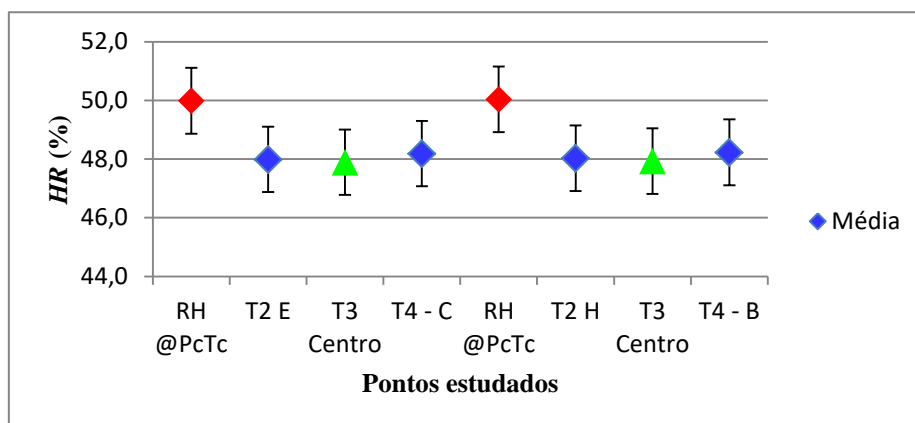


Figura 6.20 - Média e incerteza, $HR = 50 \%$

Para o patamar de 50 % o comportamento é similar ao patamar anterior.

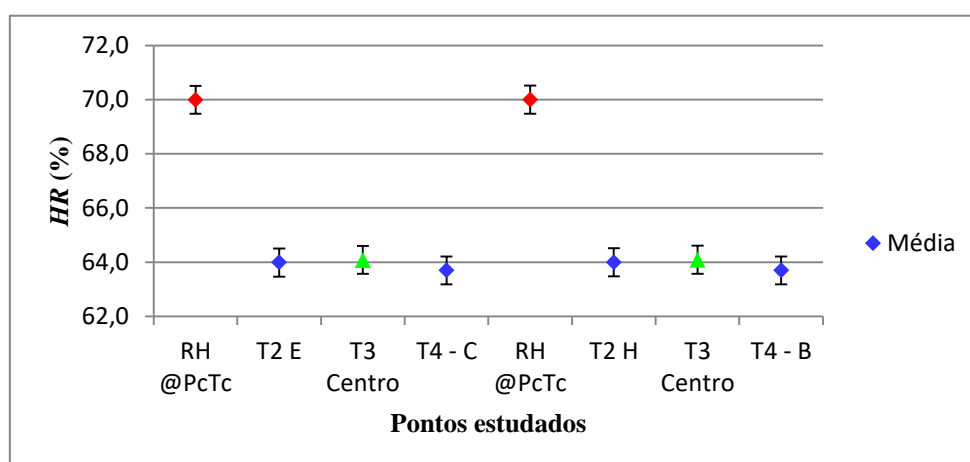


Figura 6.21 - Média e incerteza, $HR = 70 \%$

Relativamente ao patamar de 70 %, o comportamento mantém-se, porém, o equipamento utilizado para este estudo não conseguiu atingir o valor de referência, ficando um pouco abaixo.

Ainda assim, o comportamento mantém-se de ensaio para ensaio.

Os resultados do balanço de incerteza para cada ponto estudado e por patamar encontram-se na tabela 6.16.

Tabela 6.16 - Incerteza expandida

HR (%)	Incerteza Expandida U (y) (%)						
	1º Ensaio			2º Ensaio			U câmara (%)
	T2 E	T3 Centro	T4 C	T2 H	T3 Centro	T4 B	
30	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0
50	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
70	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Adotou-se, como valor de incerteza para o ensaio da câmara, o valor máximo obtido por cada patamar.

6.4. Resultados da Calibração de Instrumentos de Humidade Relativa

Este trabalho iniciou-se com a calibração de um termohigrómetro, seguindo o procedimento adotado pelo laboratório de temperatura.

Após a obtenção dos resultados relativos aos estudos efetuados, realizou-se novamente a calibração deste instrumento, utilizando a câmara em estudo como padrão para comparação de resultados.

Abaixo, ilustram-se os resultados obtidos para as calibrações realizadas.

Tabela 6.17 - Resultados MBW - 373H, ensaio $t = 20\text{ °C}$ e $HR = 30\%$

Higrómetro de Temperatura de Ponto de Orvalho					
Valor verdadeiro (°C)	Indicação termohigrómetro (°C)	Incerteza Expandida U (°C)	Valor verdadeiro (%)	Indicação termohigrómetro (%)	Incerteza Expandida U (%)
20,209	20,2	0,1	30,55	27,9	0,5

Tabela 6.18 - Resultados Câmara Climática, ensaio $t = 20\text{ °C}$ e $HR = 30\%$

Câmara Climática					
Valor verdadeiro (°C)	Indicação termohigrómetro (°C)	Incerteza Expandida U (°C)	Valor verdadeiro (%)	Indicação termohigrómetro (%)	Incerteza Expandida U (%)
20,15	20,1	0,1	30,00	28,0	1,1

Observando as tabelas com os resultados obtidos para o ensaio a 20 °C, 30 %, verifica-se que, para a grandeza temperatura, a incerteza expandida apresenta o mesmo valor em ambas as calibrações. Destaca-se que o higrómetro de ponto de orvalho possui, não só uma resolução mais baixa como também uma menor incerteza.

Relativamente à grandeza humidade relativa, observam-se maiores diferenças visto a incerteza da câmara climática em humidade relativa ser mais alta, comparativamente ao outro equipamento.

Ao assumir como valor de estabilidade o desvio-padrão dos dados adquiridos pela câmara e para a uniformidade, a média da diferença entre o valor máximo e valor mínimo, o valor de incerteza desce para 0,5 %, pois estas contribuições têm um peso significativo no balanço final.

Este fenómeno é explicado pelo facto dos valores resultantes dos estudos de uniformidade e estabilidade em humidade relativa serem superiores, pois foi adotada uma atitude pessimista.

Na prática, deverá utilizar-se, apenas, o valor referente à uniformidade térmica e considerar-se a estabilidade da amostragem escolhida para cada calibração.

Tabela 6.19 - Resultados MBW - 373H, ensaio $t = 20\text{ °C}$ e $HR = 50\%$

Higrómetro de Temperatura de Ponto de Orvalho					
Valor verdadeiro (°C)	Indicação termohigrómetro (°C)	Incerteza Expandida U (°C)	Valor verdadeiro (%)	Indicação termohigrómetro (%)	Incerteza Expandida U (%)
20,209	20,3	0,1	50,972	45,6	0,9

Tabela 6.20 - Resultados Câmara Climática, ensaio $t = 20\text{ °C}$ e $HR = 50\%$

Câmara Climática					
Valor verdadeiro (°C)	Indicação termohigrómetro (°C)	Incerteza Expandida U (°C)	Valor verdadeiro (%)	Indicação termohigrómetro (%)	Incerteza Expandida U (%)
20,18	20,2	0,1	49,99	46,0	1,5

Para o patamar de 50 %, os resultados apresentam disparidades que se podem explicar através dos argumentos referidos na análise do patamar anterior.

Novamente, se não se recorrer aos valores obtidos para os estudos de estabilidade e uniformidade, o valor de incerteza do equipamento aproxima-se do obtido anteriormente, obtendo-se uma incerteza expandida de 1,3 %.

Tabela 6.21 - Resultados MBW-373-H, ensaio $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 75\%$

Higrómetro de Temperatura de Ponto de Orvalho					
Valor verdadeiro ($^{\circ}\text{C}$)	Indicação termohigrómetro ($^{\circ}\text{C}$)	Incerteza Expandida U ($^{\circ}\text{C}$)	Valor verdadeiro (%)	Indicação termohigrómetro (%)	Incerteza Expandida U (%)
20,249	20,3	0,1	75,975	68,8	0,5

Tabela 6.22 - Resultados Câmara Climática, ensaio $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 75\%$

Câmara Climática					
Valor verdadeiro ($^{\circ}\text{C}$)	Indicação termohigrómetro ($^{\circ}\text{C}$)	Incerteza Expandida U ($^{\circ}\text{C}$)	Valor verdadeiro (%)	Indicação termohigrómetro (%)	Incerteza Expandida U (%)
20,20	20,0	0,1	75,00	68,7	0,6

Os valores de incerteza expandida obtidos para o patamar de 75 % são próximos, uma vez que para este ensaio não se possui dados relativos ao estudo de estabilidade e uniformidade térmica, tendo-se realizado cálculo para a amostra de 10 valores.

No geral, os resultados obtidos dizem-se satisfatórios, obtendo-se incertezas aceitáveis dentro dos limites de medição previstos em instrumentos de humidade relativa.

7. Conclusões

A metrologia é uma ciência transversal a todas as áreas da atividade humana por consequência a todos os setores económicos, onde são necessárias medições exatas e geradoras de confiança para o utilizador. Apresenta-se como uma oportunidade para a definição de prioridades que sustentem os desenvolvimentos da medição e os desafios emergentes numa sociedade inovadora e tecnologicamente desenvolvida.

O domínio de higrometria do laboratório de temperatura do IPQ é responsável por, entre outras tarefas, assegurar a rastreabilidade metrológica da grandeza humidade através da calibração de instrumentos de humidade relativa.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de fundamentar a utilização da câmara climática de duas-pressões na qualidade de padrão, possibilitando ao domínio de higrometria manter as suas funções e cumprir a missão a que se propõe.

De modo a avaliar a capacidade da câmara para exercer esta função, foi necessário analisar o comportamento da mesma, através da sua calibração e da realização de estudos relativamente ao seu volume útil de trabalho.

A calibração da câmara foi efetuada por meio da calibração dos seus sensores de temperatura e pressão.

A incerteza expandida fruto da calibração dos sensores de temperatura integrantes da câmara, revela uma menor incerteza, comparativamente ao valor fornecido nas especificações da mesma, o que poderá ser explicado pelo facto de ter sido utilizado um termómetro padrão rastreado aos pontos fixos da Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT90).

No respeitante às incertezas associadas à câmara climática de duas-pressões, foi desenvolvido um modelo base onde se consideraram as contribuições referentes à temperatura de saturação, temperatura da câmara, pressão de saturação e pressão da câmara com base na metodologia abordada pelo GUM.

A necessidade de obter coeficientes de sensibilidade, para cálculo das incertezas combinadas dos parâmetros medidos, teve como consequência a realização em Octave, de um programa com este objetivo. Os coeficientes de sensibilidade obtidos, foram validados através do cálculo das derivadas parciais, relativamente aos parâmetros da equação de humidade relativa, também elas implementadas nesta linguagem.

O programa realizado em Octave, permitiu ainda obter valores de humidade relativa, de acordo com os parâmetros nos quais se baseia o funcionamento da câmara. Os resultados obtidos para os diversos patamares apresentaram erros na ordem de 0,01 % em humidade relativa, o que não se considera significativo, validando, assim, o cálculo efetuado pelo *software* afeto a este sistema.

Relativamente ao valor de incerteza do equipamento, em humidade relativa, obtiveram-se diferentes valores para distintos patamares de humidade relativa. Os resultados demonstraram disparidades relativamente às especificações disponibilizadas pelo fabricante, ficando acima desse valor.

Ainda assim, os resultados consideram-se satisfatórios, tendo-se obtido valores que se encontram dentro dos limites expectáveis para este tipo de equipamento.

O estudo de estabilidade e uniformidade em temperatura constatou, na prática, que a câmara apresenta, por patamar realizado, idêntico comportamento para todos os pontos no volume útil de trabalho. Verifica-se que, para a uniformidade e a estabilidade, assim como para incerteza de ensaio por ponto, os melhores resultados obtidos foram para o ensaio a 20 °C, temperatura para a qual são efetuadas a maioria das calibrações no domínio da higrimetria do LTE.

O estudo de estabilidade e uniformidade em humidade relativa, permite reiterar algumas das conclusões já obtidas para a temperatura. Nos patamares de humidade relativa realizados, o comportamento é idêntico para todos os pontos no volume útil de trabalho. O valor mais alto corresponde ao patamar de 50 %, o que confirma os resultados obtidos em termos históricos para a realização deste valor.

Os valores de estabilidade e uniformidade obtidos para as duas grandezas serão utilizados como contribuição de incerteza no balanço final da incerteza de medição de forma independente do instrumento padrão escolhido para a calibração (higrómetro de ponto de orvalho ou câmara climática).

O critério de aceitação a considerar de futuro será fundamentado nas conclusões obtidas.

Da análise inicial dos equipamentos de geração de humidade relativa do LTE, resultou a calibração de um termohigrómetro de acordo com o procedimento em vigor.

Nesta calibração utilizou-se o higrómetro de ponto de orvalho como padrão e a câmara como meio termorregulado. Após a caracterização, análise e integração da informação técnica e estatística associada aos estudos efetuados, foi realizada nova calibração para o mesmo instrumento, recorrendo à câmara como padrão com o objetivo de validar os resultados obtidos.

Comparando os resultados das duas calibrações pode-se concluir, que em termos de erro, os valores obtidos são idênticos, diferindo no valor de incerteza final.

A calibração realizada com a câmara como padrão apresenta, no geral, valores de incerteza superiores. Uma vez que a câmara apresenta, por si só maior incerteza assim como uma maior resolução, os resultados obtidos não surpreenderam. Salienta-se, ainda, que as contribuições consideradas no que diz respeito à estabilidade e uniformidade em humidade relativa, resultaram em valores superiores, visto ter-se adotado uma atitude pessimista no estudo realizado, o que se converte numa incerteza de calibração superior.

Posto isto, os resultados obtidos demonstram que, apesar da calibração com o higrómetro de ponto de orvalho apresentar valores mais baixos, as incertezas obtidas com a câmara climática consideram-se aceitáveis relativamente à exatidão requerida pela maioria dos instrumentos de medição de humidade relativa.

Desta forma, constatou-se na prática, que a câmara climática de duas- pressões, apresenta um comportamento em termos de estabilidade, uniformidade e incertezas associadas que a caracterizam como um instrumento de medição com qualidade metrológica para ser utilizado como padrão.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação vai permitir ao Laboratório de Temperatura manter o funcionamento do domínio sem interrupções, utilizando a câmara como padrão, garantindo rastreabilidade no intervalo de medição de 10 % a 90 % de humidade relativa.

Como trabalhos futuros refere-se a importância de realizar novo estudo de estabilidade e uniformidade para a grandeza temperatura, alargando a gama de temperaturas, de forma a abranger o maior número possível de valores, reduzindo assim, erros de interpolação.

Destaca-se a importância de realizar uma comparação direta com o higrómetro de temperatura de ponto de orvalho, algo que não foi possível, visto o equipamento encontrar-se em calibração no exterior.

Sugere-se ainda, a realização de um novo estudo com o objetivo de avaliar o impacto da variação da carga térmica no volume útil de trabalho da câmara.

Para assegurar a qualidade metrológica do equipamento, recomenda-se uma avaliação da deriva da câmara climática, considerando esse valor como fonte de incerteza no balanço da incerteza de medição.

Bibliografia

- [1] IPQ, «Instituto Português da Qualidade», 2017. [Online]. Disponível em: <http://ipq1sapp02:8088/PT/IPQ/Pages/IPQ.aspx>. [Acedido: 01-Out-2017].
- [2] C. Sousa, «Metrologia Notas históricas», *Catim*, p. 35, 2010.
- [3] IPQ, «Pesos e Medidas em Portugal». IPQ, Caparica, 2000.
- [4] L. S. Lopes, «A cultura da medição em Portugal ao longo da história», *Educ. e Matemática*, pp. 42–48, 2005.
- [5] IPQ, *Vocabulário Internacional de Metrologia*, 1^a Edição. 2012.
- [6] F. Redgrave e P. Howarth, *Metrology – In Short*, 3^a Edição. 2008.
- [7] *Decreto-lei n.º 71/2012*. 2012, pp. 1316–1319.
- [8] IPQ, «Departamento de Metrologia». IPQ, 2015.
- [9] Bureau International des Poids et Mesures, «BIPM», 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.bipm.org/en/about-us/role.html>. [Acedido: 06-Nov-2017].
- [10] *Decreto de lei n.º 128/2010*. 2010, pp. 5444–5454.
- [11] BIPM, *International System of Units (SI)*, 8^a Edição. 2006.
- [12] Folheto Informativo, «Domínio Metrológico da Temperatura».IPQ.
- [13] A. T. B. Rodrigo P. B. Costa-Félix, «Sistema Internacional de Unidades (SI)», em *Metrologia Vol. 1: Fundamentos*, Brasport, Ed. 2017, p. 33.
- [14] JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1^a Edição. 2008.
- [15] Instituto Português de Acreditação, *Avaliação da Incerteza de Medição em Calibração*. 2015.
- [16] «1.1 - Erros, Efeitos e Correções - Incerteza de Medição | Portal Action». [Online]. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/incerteza-de-medicao/11-erros-efeitos-e-correcoes>. [Acedido: 13-Fev-2018].
- [17] «Probability Distributions for Measurement Uncertainty | isobudgets». [Online]. Disponível em: <http://www.isobudgets.com/probability-distributions-for-measurement-uncertainty/>. [Acedido: 13-Fev-2018].
- [18] «Humidity- Part 1: Terms,definitions and formulae», BS 1339-1, 2002.
- [19] S. A. Bell, «The Beginner’s Guide to Humidity». 2012.
- [20] E. P. Cabral, «Técnicas de Calibração em Higrometria», *Qualiatria*, vol. 17, pp. 5–6, 1993.
- [21] M. Scott *et al.*, «A Guide to the Measurement of Humidity». Institute of Measurement and Control, 1996.
- [22] P. R. Wiederhold, «Definitions and fundamentals», em *Water Vapor Measurement*:

- Methods and Instrumentation*, CRC Press, Ed. 1997, pp. 7–26.
- [23] «Humidity- Part 3 : Guide to the measurement of humidity», BS 1339-3, 2004.
 - [24] Presto, «How does Humidity Chambers Work?» [Online]. Disponível em: <http://www.prestogroup.com/articles/how-does-humidity-chambers-work/>. [Acedido: 09-Fev-2018].
 - [25] MBW Calibration Ltd. e Manual, «Dew Point Mirror MBW 373».
 - [26] B. Tanner, «Considerations for choosing technology», 2011. [Online]. Disponível em: http://online.cofa.unsw.edu.au/sites/default/files/episode-pdf/Technology_LTTOn.pdf.
 - [27] T. S. Corporation, «Benchtop Two-Pressure Humidity Generator Series 2500». Thunder Scientific Corporation, 2004.
 - [28] B. Hardy, «Trust But Verify-Practical Approaches to Humidity Generation and Measurement», *RH Syst. White Pap.*, n. 1, p. 10, 2004.
 - [29] B. Hardy, «ITS-90 Formulations for Vapor Pressure, Frostpoint Temperature, Dewpoint Temperature, and Enhancement Factors in the range –100 to +100», *Thunder Sci. Corp. Albuquerque, NM, USA*, 1998.
 - [30] T. S. Corporation, «ControLog for the Model 2500 Humidity Generator». Thunder Scientific Corporation, 2002.
 - [31] Procedimento Técnico PT 5021012501-02, «Procedimento de Calibração de Instrumentos de Medição de Humidade Relativa». IPQ, 2017.
 - [32] «Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors», EN 60751, 2008.
 - [33] Procedimento Técnico PT5010001514-04, «Cálculo de Incertezas na Calibração de Termómetros e Sensores de Temperatura». IPQ, 2016.
 - [34] J. Garcia Skabar, «Uncertainty Estimations for Standard Humidity Generator of INTI», *Int. J. Thermophys.*, vol. 36, n. 8, pp. 2172–2184, 2015.
 - [35] B. Hardy e T. S. Corporation, «Relative Humidity Uncertainty Analysis of the Thunder Scientific Model 2500 Two-Pressure Humidity Generator», pp. 1–13, 1998.
 - [36] J. Martins, J. Alonso, e P. Sturdza, «The Complex-Step Derivative Approximation», *ACM Trans. Math. Softw.*, vol. 29, n. 3, pp. 245–262, 2003.
 - [37] R. R. De Paula, «Método de Monte Carlo e Aplicações», 2014.
 - [38] GT06, «Guia RELACRE 19 - Câmaras Térmicas». 2004.
 - [39] E. Filipe, *Curso de Metrologia da Temperatura*. IPQ, 1999.
 - [40] J. D. Brionizio e F. B. Mainier, «Avaliação de Temperatura e Umidade de uma Câmara Climática», *ENQUALAB-2006 – Congr. e Feira da Qual. em Metrol. Rede Metrológica do Estado São Paulo - REMESP*, 2006.

Anexos

Anexo I - Certificado de Calibração do Higrómetro de Ponto de Orvalho



Ctra. a Ajalvir, km 4. 28850 TORREJON DE ARDOZ. (Madrid). España.
Tf.: (+34) 915 201 714 / Fax: (+34) 915 201 645 / labth@inta.es / <http://www.inta.es>

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Certificate of Calibration

Número (Number): INTA-TH-C-10704

Objeto(s) / Descripción: HIGRÓMETRO OPTICO
Object(s) / Description :

Fabricante / Marca : MBW
Manufacturer / Trademark :

Modelo / N° serie : 373H 05-0812
Model / Serial Number :

Método / Procedimiento : TH/PRC/7234/106/INTA
Method / Procedure :

Fecha(s) de Calibración : 04 de Abril a 12 de Junio 2014
Date(s) of calibration :

Expedido a : INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE
Issued to : Laboratorio Nacional de Metrología; Departamento de Física
Rua Antonio Gíao, 2
2829-513 Caparica (PORTUGAL)

Fecha de Emisión : 25 de junio de 2014 (TH415845)
Date of issue :

N° de páginas : 5
Number of pages :

Sello :
Stamp :

**El Jefe del Laboratorio
de Temperatura y Humedad**
The Head of the Temperature and Humidity Laboratory

Fdo. Dr Robert Benyon Puig

Este Certificado no atribuye al objeto calibrado otras características que las indicadas por los datos aquí contenidos. Los resultados se refieren al momento y condiciones en que se efectuaron las mediciones. Se garantiza trazabilidad a los patrones nacionales. No se permite la reproducción parcial de este documento sin autorización expresa para ello.

El presente Certificado es coherente con las Capacidades de Medida y Calibración (CMC) incluidas en el Anexo C del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (ARM) redactado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Según el ARM, todos los Institutos participantes reconocen entre sí la validez de sus certificados de calibración y de medida para las magnitudes, campos e incertidumbres especificados en el citado Anexo C (para más detalles véase <http://www.bipm.org>).

This Certificate does not confer to the object calibrated attributes beyond those shown by the data contained herein. Results refer to the dates and conditions in which measurements were carried out. Traceability to national standards is guaranteed. Partial reproduction of this document is not permitted without written permission.

This Certificate is consistent with Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <http://www.bipm.org>).

Formato: TH/FMT/7234/063/INTA Ed. 01

AJUSTE A LA NORMA EN 60751:2008

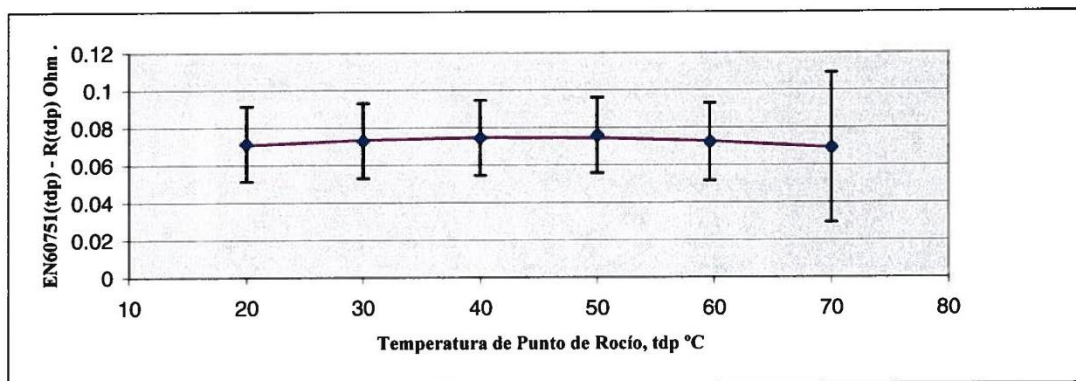
MBW ; 373H ; 05-0812

MARGEN: (-200 °C a 0 °C) Ajuste: $R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^\circ C)^3$

MARGEN: (0 °C a +850 °C) Ajuste: $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$

HEATER	ON
t_{ini} (°C)	20
t_{fin} (°C)	70

COEFICIENTES	
R_0 (Ω)	$99,9391 \pm 0,0031$
A (°C ⁻¹)	$3,9041E-03 \pm 1,6079E-06$
B (°C ⁻²)	$-5,0082E-07 \pm 1,8864E-08$
C (°C ⁻¹)	
$S_{R/U}$ (3)	0,018



PR Patrón	PR Instrumento	ΔR (1)		Residuos	U (k=2)	
°C	Ohm	Ohm	°C	°C	Ohm (2)	°C (3)
19,999	107,722	0,071	0,184	-0,001	0,02	0,05
30,002	111,601	0,073	0,189	0,002	0,02	0,05
39,982	115,459	0,075	0,193	0,001	0,02	0,05
50,003	119,323	0,076	0,197	-0,003	0,02	0,05
59,636	123,030	0,072	0,188	0,001	0,02	0,05
69,992	127,003	0,069	0,181	0,000	0,04	0,10

(1) Corrección ($R_{tablas} - R$), respecto a las tablas de referencia: EN 60751:2008, expresados en Ohm y °C.

(2) Incertidumbre expandida de medida para k=2.

(3) Error típico de la estimación para R/U.



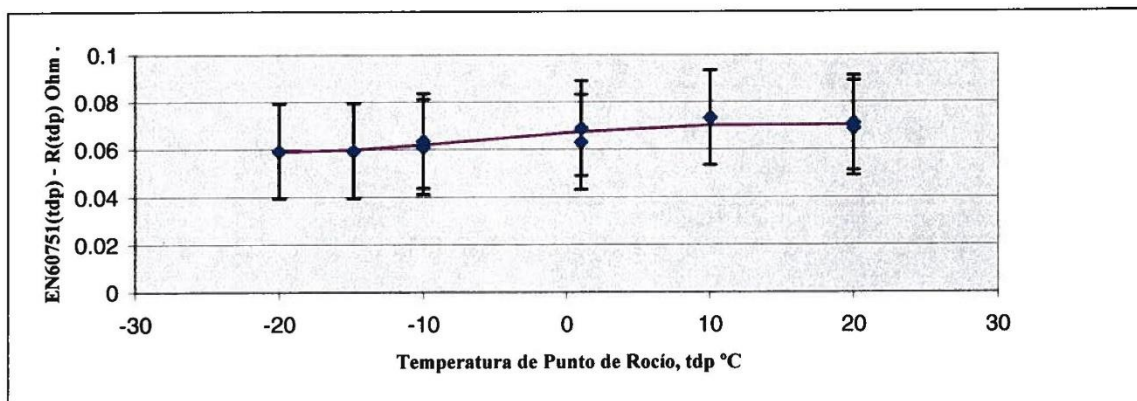
AJUSTE A LA NORMA EN 60751:2008

MBW ; 373H ; 05-0812

MARGEN: (-200 °C a 0 °C) Ajuste: $R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3)$
MARGEN: (0 °C a +850 °C) Ajuste: $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$

HEATER	OFF
t_{ini} (°C)	-20
t_{fin} (°C)	20

COEFICIENTES	
R_0 (Ω)	$99,9327 \pm 0,0014$
A (°C ⁻¹)	$3,9065E-03 \pm 1,4591E-06$
B (°C ⁻²)	$-4,3897E-07 \pm 1,0521E-07$
C (°C ⁻³)	$-7,1315E-11 \pm 5,0000E-02$
$S_{R/U}$ (3)	0,052



PR Patrón	PR Instrumento	ΔR (1)		Residuos	U (k=2)	
°C	Ohm	Ohm	°C	°C	Ohm (2)	°C (3)
10,012	103,834	0,073	0,188	-0,008	0,02	0,05
1,024	100,331	0,069	0,176	-0,003	0,02	0,05
-9,987	96,027	0,064	0,162	-0,004	0,02	0,05
-9,989	96,026	0,064	0,163	-0,004	0,02	0,05
-9,989	96,029	0,061	0,156	0,003	0,02	0,05
19,997	107,723	0,069	0,178	0,004	0,02	0,05
20,000	107,722	0,071	0,183	-0,002	0,02	0,05
0,998	100,327	0,063	0,162	0,012	0,02	0,05
-19,998	92,102	0,059	0,151	0,000	0,02	0,05
-14,839	94,128	0,059	0,152	0,002	0,02	0,05

- (1) Corrección ($R_{tablas} - R$), respecto a las tablas de referencia: EN 60751:2008, expresados en Ohm y °C.
(2) Incertidumbre expandida de medida para $k=2$.
(3) Error típico de la estimación para R/U .



Anexo II - Certificado de Calibração do Higrómetro

Instituto Português da  Qualidade

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA Portugal
Tel. (+351) 212 948 186
Fax (+351) 212 948 188
metrologia@ipq.pt
www.ipq.pt

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO 502.10 / 1742980
NUMBER

PÁGINA 1 de 4
PAGE

ENTIDADE ENTITY	
NOME NAME	IPQ - Laboratório de Propriedade de Líquidos
ENDEREÇO ADDRESS	Rua António Gião, 2 2829-513 Caparica
INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO MEASURING INSTRUMENT	
DESIGNAÇÃO DESIGNATION	Termo higrómetro
MARCA MANUFACTURER	Sensor
MODELO MODEL	VAISALA
NÚMERO SERIAL NUMBER	PTU 301
COMPOSIÇÃO COMPONENTS	IO120002
CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS METROLOGICAL CHARACTERISTICS	
CLASSE DE EXATIDÃO ACCURACY CLASS	---
INTERVALO DE INDICAÇÃO INDICATION INTERVAL	---
RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR RESOLUTION OF THE DISPLAYING DEVICE	0,1 %; 0,1°C
OPERAÇÃO EFETUADA MEASUREMENT	
TIPO TYPE	Calibração
DATA DATE	2017-10-06
MÉTODO METHOD	Calibração por comparação com o padrão de trabalho LTH3 em meio estabilizado com regulação de humidade relativa. Procedimento LNM 5021012501
DOCUMENTO DE REFERÊNCIA REFERENCE DOCUMENT	Ao SI através da realização dos Pontos Fixos da EIT90
RASTREABILIDADE METROLÓGICA METROLOGICAL TRACEABILITY	
CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA REFERENCE OPERATING CONDITION	$t = (20 \pm 2) ^\circ\text{C};$ $HR = (50 \pm 10)\%$
INCERTEZA EXPANDIDA EXPANDED MEASUREMENT UNCERTAINTY	Ver página 2
RESULTADO DE MEDIÇÃO MEASUREMENT RESULT	Ver página 2
<div><div>ISABEL MARIA MELO LOPES DIAS LÓIO</div><div>Assinado de forma digital por ISABEL MARIA MELO LOPES DIAS LÓIO Dados: 2017.10.10 15:41:02 +01'00'</div></div> <div><div>João Luís Vieira Alves e Sousa</div><div>Assinado de forma digital por João Luís Vieira Alves e Sousa Dados: 2017.10.10 16:49:18 +01'00'</div></div>	
<div>RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO Head of Domain HIGROMETRIA</div> <div>DIRETOR DA UNIDADE LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA Director of the National Metrology Laboratory Unit</div>	

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)
This calibration certificate may only be reproduced in full and only refers to the measuring instrument (s) tested (s)



**CERTIFICADO
DE CALIBRAÇÃO**
CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO 502.10 / 1742980
NUMBER

PÁGINA 2 de 4
PAGE

RESULTADO:

Ensaio para $t = 20\text{ °C}$ e $HR=30\%$

Valor verdadeiro da temperatura	Indicação do Termo higrómetro n° I0120002	Incerteza expandida
$t_{ref} / \text{°C}$	$t / \text{°C}$	$t / \text{°C}$
20,209	20,2	0,1
Valor verdadeiro da humidade relativa	Indicação do Termo higrómetro n° I0120002	Incerteza expandida
(%)	(%)	(%)
30,557	27,9	0,5

RESULTADO:

Ensaio para $t = 20\text{ °C}$ e $HR=50\%$

Valor verdadeiro da temperatura	Indicação do Termo higrómetro n° I0120002	Incerteza expandida
$t_{ref} / \text{°C}$	$t / \text{°C}$	$t / \text{°C}$
20,209	20,3	0,1
Valor verdadeiro da humidade relativa	Indicação do Termo higrómetro n° I0120002	Incerteza expandida
$HR / (\%)$	$HR / (\%)$	%
50,972	45,6	0,9



**CERTIFICADO
DE CALIBRAÇÃO**
CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO 502.10 / 1742980
NUMBER

PÁGINA 3 de 4
PAGE

RESULTADO:

Ensaio para $t = 20\text{ °C}$ e $HR=75\%$

Valor verdadeiro da temperatura	Indicação do Termo higrômetro n° 10120002	Incerteza expandida
$t_{ref} / \text{°C}$	$t / \text{°C}$	$t / \text{°C}$
20,249	20,3	0,1

Valor verdadeiro da humidade relativa	Indicação do Termo higrômetro n° 10120002	Incerteza expandida
$HR / \%$	$HR / \%$	$HR / \%$
75,975	68,8	0,5

RESULTADO:

Ensaio para $t = 15\text{ °C}$ e $HR=50\%$

Valor verdadeiro da temperatura	Indicação do Termo higrômetro n° 10120002	Incerteza expandida
$t_{ref} / \text{°C}$	$t / \text{°C}$	$t / \text{°C}$
15,276	15,4	0,1

Valor verdadeiro da humidade relativa	Indicação do Termo higrômetro n° 10120002	Incerteza expandida
$HR / \%$	$HR / \%$	$HR / \%$
50,931	46,4	1,0



**CERTIFICADO
DE CALIBRAÇÃO**
CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO 502.10 / 1742980
NUMBER

PÁGINA 4 de 4
PAGE

RESULTADO:

Ensaio para $t = 25\text{ °C}$ e $HR=50\%$

Valor verdadeiro da temperatura	Indicação do Termo higrómetro n° 10120002	Incerteza expandida
$t_{ref} / \text{°C}$	$t / \text{°C}$	$t / \text{°C}$
25,057	24,9	0,1

Valor verdadeiro da humidade relativa	Indicação do Termo higrómetro n° 10120002	Incerteza expandida
$HR / \%$	$HR / \%$	$HR / \%$
50,666	46,7	0,6

A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k = 2$, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade expandida de 95 %, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections).

The reported expanded uncertainty is stated as the standard measurement uncertainty multiplied by the coverage factor $k = 2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The uncertainty was calculated according to the document "Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)".

Anexo III - Exemplo Folha de Cálculo Calibração RTD3

[illegible]

Anexo IV - Exemplo Folha de Balanço de Incerteza RTD3- Ensaio $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

[illegible]

Anexo V - Certificado de Calibração RTD3

Instituto Português da  Qualidade

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA Portugal
Tel. (+351) 212 948 186
Fax (+351) 212 948 188
metrologia@ipq.pt
www.ipq.pt

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO 502.10 / 1744022
NUMBER

PÁGINA 1 de 2
PAGE

ENTIDADE

ENTITY

NOME

NAME

ENDEREÇO

ADDRESS

IPQ - Laboratório de Temperatura - Higrometria

Rua António Gião, 2 2829-513 Caparica

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

MEASURING INSTRUMENT

DESIGNAÇÃO

DESIGNATION

Termo higrómetro

Sensor

MARCA

MANUFACTURER

MODELO

MODEL

NÚMERO

SERIAL NUMBER

COMPOSIÇÃO

COMPONENTS

RTD3

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

METROLOGICAL CHARACTERISTICS

CLASSE DE EXATIDÃO

ACCURACY CLASS

INTERVALO DE INDICAÇÃO

INDICATION INTERVAL

RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR

RESOLUTION OF THE DISPLAYING DEVICE

0,01 %; 0,01°C

OPERAÇÃO EFETUADA

MEASUREMENT

TIPO

TYPE

DATA

DATE

METODO

METHOD

DOCUMENTO DE REFERÊNCIA

REFERENCE DOCUMENT

RASTREABILIDADE METROLÓGICA

METROLOGICAL TRACEABILITY

Calibração

2017-11-14

Calibração por comparação com o padrão de trabalho LTH3 em meio estabilizado com
regulação de humidade relativa.

Procedimento LNM 5021012501

Ao SI através da realização dos Pontos Fixos da EIT90

INCERTEZA EXPANDIDA

EXPANDED MEASUREMENT UNCERTAINTY

RESULTADO DE MEDIÇÃO

MEASUREMENT RESULT

Ver página 2

Ver página 2

ISABEL MARIA MELO LOPES

DIAS LÓIO

Assinado de forma digital por ISABEL MARIA
MELO LOPES DIAS LÓIO
Dados: 2017.12.06 12:02:02 Z

RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO

Head of Domain

HIGROMETRIA

DIRETOR DA UNIDADE

LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA

Director of the National Metrology Laboratory Unit

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s)
This calibration certificate may only be reproduced in full and only refers to the measuring instrument (s) tested (s)



**CERTIFICADO
DE CALIBRAÇÃO**
CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO 502.10 / 1744022
NUMBER

PÁGINA 2 de 2
PAGE

CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA
REFERENCE OPERATING CONDITION

$t = (20 \pm 2) ^\circ\text{C};$ $HR = (50 \pm 10)\%;$

RESULTADO:

Ensaio para $t = 0 ^\circ\text{C}$, $t = 20 ^\circ\text{C}$, $t = 35 ^\circ\text{C}$, $t = 50 ^\circ\text{C}$, $t = 70 ^\circ\text{C}$

Valor verdadeiro da temperatura	Indicação do Termo higrômetro n ° RTD3	Incerteza expandida
$t_{\text{ref}} / ^\circ\text{C}$	$t / ^\circ\text{C}$	$t / ^\circ\text{C}$
-0,0063	0,00	0,01
20,1740	20,16	0,01
34,9938	34,99	0,01
50,2587	50,27	0,01
70,1958	70,23	0,01

A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k = 2$, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade expandida de 95 %, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections).

The reported expanded uncertainty is stated as the standard measurement uncertainty multiplied by the coverage factor $k = 2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The uncertainty was calculated according to the document "Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)".

Anexo VI- Exemplo Balanço de Incerteza da Câmara

[illegible]

Anexo VII - Exemplo Folha de Cálculo PRT-100

Valores de certificado			CANAL 0	IPQ LTE	06/12/2017	pt100 s/unidade	nº 501.21 -LTE	PET nº 501211744049									
V.V. (°C)	nº (Ω)	inc.exp. U(°C)															
-0,0143	100,012	0,005	0,002														
20,1289	107,861	0,005	0,002														
35,0286	113,641	0,007	0,002														
50,2650	119,521	0,007	0,002														
70,1224	127,145	0,010	0,004														
			0,002														
Temperatura a 0 °C			Temperatura a 20 °C			Temperatura a 35 °C			Temperatura a 50 °C			Temperatura a 70 °C					
Valores referência (Ω)	Valores referência (°C)	Valores indicação (Ω)	Valores referência (Ω)	Valores referência (°C)	Valores indicação (Ω)	Valores referência (Ω)	Valores referência (°C)	Valores indicação (Ω)	Valores referência (Ω)	Valores referência (°C)	Valores indicação (Ω)	Valores referência (Ω)	Valores referência (°C)	Valores indicação (Ω)	Valores referência (Ω)	Valores referência (°C)	Valores indicação (Ω)
SMT15	SMT15		SMT15	SMT15		SMT15	SMT15		SMT15	SMT15		SMT15	SMT15		SMT15	SMT15	
25,0593	-0,0143	100,01200	27,0664	20,1282	107,86100	28,5432	35,0285	113,64000	30,0464	50,2652	119,52100	31,9951	70,1241	127,14500			
25,0593	-0,0143	100,01100	27,0664	20,1282	107,86100	28,5432	35,0285	113,64000	30,0464	50,2652	119,52100	31,9948	70,121	127,14600			
25,0593	-0,0143	100,01100	27,0665	20,1292	107,86100	28,5432	35,0285	113,64000	30,0464	50,2652	119,52100	31,9948	70,121	127,14500			
25,0593	-0,0143	100,01200	27,0665	20,1292	107,86100	28,5432	35,0285	113,64100	30,0464	50,2652	119,52100	31,9946	70,119	127,14600			
25,0593	-0,0143	100,01100	27,0665	20,1292	107,86100	28,5432	35,0285	113,64100	30,0463	50,2642	119,52100	31,9949	70,122	127,14500			
25,0593	-0,0143	100,01100	27,0665	20,1292	107,86100	28,5432	35,0285	113,64100	30,0463	50,2642	119,52100	31,9951	70,1241	127,14500			
25,0593	-0,0143	100,01100	27,0664	20,1282	107,86100	28,5432	35,0285	113,64100	30,0464	50,2652	119,52000	31,995	70,1231	127,14500			
25,0593	-0,0143	100,01200	27,0665	20,1292	107,86100	28,5432	35,0285	113,64100	30,0464	50,2652	119,52100	31,995	70,1231	127,14600			
25,0593	-0,0143	100,01200	27,0665	20,1292	107,86100	28,5432	35,0285	113,64100	30,0464	50,2652	119,52100	31,995	70,1231	127,14400			
25,0593	-0,0143	100,01200	27,0665	20,1292	107,86100	28,5433	35,0295	113,64000	30,0464	50,2652	119,52100	31,995	70,1231	127,14500			
Média	25,0593	-0,0143	100,01150	27,06647	20,1289	107,86100	28,5432	35,0286	113,64060	30,0464	50,2650	119,52090	31,9949	70,1224	127,14520		
Desv.Padrão		3,66E-18	5,27E-04		4,83E-04	1,50E-14		3,16E-04	5,16E-04		4,22E-04	3,16E-04		1,61E-03	6,32E-04		
Variância			2,78E-08		2,24E-09				2,67E-08			1,00E-08			4,00E-08		
Desv.Padrão Média			1,67E-04		4,74E-15				1,63E-04			1,00E-04			2,00E-04		

Anexo VIII - Exemplo Cálculo Constantes PRT-100

IPQ LTE		06/12/2017	
pt100 s/unidade leitura		nº 501.21 -LTE EST1 A	PET nº 501211744049
CANAL 0			
t(°C)	Rt/Ro		
0,000	1,000000E+00		
20,129	1,078426E+00		
35,029	1,136212E+00		
50,265	1,195005E+00		
70,122	1,271235E+00		
Valores de certificado			
PT100-LPL			
t(°C)	R (t)	incerteza expandida °C	
-0,0143	100,012	0,002	
20,1289	107,861	0,002	
35,0286	113,641	0,002	
50,2650	119,521	0,002	
70,12236	127,145	0,004	
0,0000	0,000	0,002	
delta (t °C)	delta R		
20,143	7,8495		
-0,014	-0,006		
Ro	100,0171	valor interpolado para 0,0 °C	

$$y = -5,788120E-07x^2 + 3,908697E-03x + 9,999959E-01$$

Série1

Polinomial (Série1)

$y = -5,788120E-07x^2 + 3,908697E-03x + 9,999959E-01$				
	y	=	-5,788120E-07 x2	3,908697E-03 x
CONSTANTES				
R0	100,0167			
A	3,9087E-03			
B	-5,7881E-07			

Anexo IX - Exemplo Certificado de Calibração PRT-100

Instituto Português da  Qualidade

PORTUGUESE INSTITUTE FOR QUALITY

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA Portugal
Tel. (+351) 212 948 186
Fax (+351) 212 948 188
metrologia@ipq.pt
www.ipq.pt

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO 501.21 / 1744047
NUMBER

PÁGINA 1 de 2
PAGE

ENTIDADE

ENTITY

NOME

NAME

ENDEREÇO

ADDRESS

IPQ - Laboratório de Temperatura

Rua António Gião, 2 2829-513 Caparica

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

MEASURING INSTRUMENT

DESIGNAÇÃO

DESIGNATION

Termómetro de resistência de platina de 100 ohm

MARCA

MANUFACTURER

MODELO

MODEL

NÚMERO

SERIAL NUMBER

CONSTITUIÇÃO

COMPONENTS

Sensor

Unidade de leitura

AΣL

F250

501.21-G144GA 13

12740018

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

METROLOGICAL CHARACTERISTICS

CLASSE DE EXATIDÃO

ACCURACY CLASS

INTERVALO DE INDICAÇÃO

INDICATION INTERVAL

RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR

RESOLUTION OF THE DISPLAYING DEVICE

0,001 Ω

OPERAÇÃO EFETUADA

OPERATION

TIPO

TYPE

DATA

DATE

MÉTODO

METHOD

DOCUMENTO DE REFERÊNCIA

REFERENCE DOCUMENT

RASTREABILIDADE METROLÓGICA

METROLOGICAL TRACEABILITY

INCERTEZA EXPANDIDA

EXPANDED MEASUREMENT UNCERTAINTY

RESULTADO DE MEDIÇÃO

MEASUREMENT RESULT

Calibração

2017-12-06

Calibração por comparação com o termómetro padrão SMT15 em banho
termorregulado.

Procedimento PT5010095506

Ao SI através da realização dos Pontos Fixos da EIT90

Ver página 2

ISABEL MARIA MELO
LOPES DIAS LÓIO

Assinado de forma digital por ISABEL
MARIA MELO LOPES DIAS LÓIO
Dados: 2018.01.11 12:29:43 Z

RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO
Head of Domain
TERMOMETRIA

DIRETOR DA UNIDADE
LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA
Director of the National Metrology Laboratory Unit

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s).
This calibration certificate may only be reproduced in full and only refers to the tested measuring instrument(s).



Este Certificado está de acordo com as Capacidades de Medição e Calibração (CMC), incluídas no Anexo C, do Acordo de Reconhecimento Mútuo (CIPM-MRA), redigido pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM). No âmbito do CIPM-MRA, todos os Laboratórios Nacionais participantes reconhecem reciprocamente a validade dos Certificados de Calibração e de Medição, emitidos para as grandezas, domínios e incertezas de medição, mencionados no Anexo C (para mais detalhes veja www.bipm.org).

This certificate is consistent with the capabilities that are included in Appendix C of the CIPM-MRA drawn up by the CIPM. Under the CIPM-MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <http://www.bipm.org>).

RLNM43



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO 501.21 / 1744047
NUMBER

PÁGINA 2 de 2
Page

CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA
REFERENCE OPERATING CONDITION

$t = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$; $HR = (50 \pm 10)\%$;

RESULTADO:

Ensaio para $t = 0 ^\circ\text{C}$, $t = 20 ^\circ\text{C}$, $t = 35 ^\circ\text{C}$, $t = 50 ^\circ\text{C}$, $t = 70 ^\circ\text{C}$

Valor verdadeiro da temperatura	Indicação do Termómetro 501.21-G144GA 13	Incerteza expandida
$t_{\text{ref}} / ^\circ\text{C}$	R / Ω	$t / ^\circ\text{C}$
-0,0143	99,958	0,005
20,1289	107,809	0,005
35,0286	113,588	0,007
50,2650	119,468	0,007
70,1224	127,093	0,010

Coefficientes

Ro 99,9634
A 3,9110 E-03
B -5,8040 E-07

incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k = 2$, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade expandida de 95 %, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento *Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)*.

The reported expanded uncertainty is stated as the standard measurement uncertainty multiplied by the coverage factor $k = 2$, which for a normal distribution corresponds to a probability of approximately 95 %. The uncertainty was calculated according to the document "Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)".

Anexo X - Exemplo Tratamento de Dados: Estudo Humidade

20 °C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
-------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Anexo XI - Exemplo Tratamento de Dados: Estudo Temperatura

	F	H	C	A	Tc	Saturation Temp, Ts [°C]					
15:13:54	34,19	33,9	34,01	34,23	34,123	35,0001					
15:14:54	34,2	33,92	34,03	34,24	34,1387	34,9998					
15:15:54	34,2	33,94	34,05	34,25	34,1624	35,0008					
15:16:54	34,2	33,96	34,06	34,26	34,1809	34,999					
15:17:54	34,23	33,97	34,08	34,27	34,1989	35,0034					
15:18:54	34,24	33,98	34,1	34,28	34,2026	34,9999					
15:19:54	34,24	33,99	34,11	34,29	34,2177	35,001					
15:20:54	34,25	34,01	34,13	34,3	34,223	34,9982					
15:21:55	34,26	34,02	34,14	34,32	34,2416	34,999					
15:22:55	34,28	34,03	34,15	34,32	34,2559	35,0009					
15:23:56	34,3	34,03	34,17	34,33	34,2645	34,9997					
15:24:56	34,3	34,04	34,18	34,34	34,2815	35,0015					
15:25:56	34,32	34,04	34,19	34,35	34,2826	34,9989					
15:26:56	34,32	34,05	34,2	34,35	34,2889	34,9997					
15:27:56	34,32	34,06	34,21	34,36	34,3025	35,0065					
15:28:56	34,33	34,07	34,22	34,37	34,3044	35,0028					
15:29:57	34,34	34,08	34,23	34,37	34,3168	34,9999					
15:30:57	34,34	34,09	34,24	34,38	34,3222	34,998					
15:31:57	34,34	34,1	34,25	34,39	34,3414	34,9994					
15:32:57	34,36	34,12	34,26	34,4	34,3423	35,0028					
Média	34,28	34,02	34,15	34,32	34,25	35,00	Uniformidade Térmica	0,30			
Desvio	0,06	0,06	0,08	0,05	0,07	0,00					
Variância	1,57E-04	1,85E-04	2,95E-04	1,37E-04	2,20E-04	2,08E-07					
Repetibilidade	1,25E-02	1,36E-02	1,72E-02	1,17E-02	1,48E-02	4,56E-04					
Uniformidade	0,09	0,11	0,13	0,09	0,11	0,00					
	0,17	0,22	0,25	0,17	0,22	0,01	Estabilidade térmica	0,25			

Anexo XII - Código Octave

```

function [output_alfa] = alfa (T) %Cálculo de alpha
A=[3.53624E-4 2.9328363E-5 2.6168979E-7 8.5813609E-9];
output_alfa = 0;
for i=1:4
    output_alfa = output_alfa + A(i)*((T)^(i-1));
end
format long

endfunction

function [output_beta] = beta (T) % Cálculo de Beta
B=[-1.07588E1 6.3268134E-2 -2.5368934E-4 6.3405286E-7];

output_beta=0;
for i=1:4
    output_beta= output_beta + B(i)*(T^(i-1));
end
output_beta=exp(output_beta);
format long
endfunction

function [som_ew]= som_ew(T) %Somatório função ew
C =[-2.8365744E3 -6.028076559E3 1.954263612E1 -2.737830188E-2
1.6261698E-5 7.0229056E-10 -1.8680009E-13];
som_ew =0;
for i=1:7
    som_ew = som_ew + (C(i)*((T+273.15)^(i-3)));
end
endfunction

function [ew]= ew (T) %Cálculo graus efetivos de saturação (ew)
D = [2.7150305];
ew = exp ((som_ew(T))+ D*log(T+273.15)) ;

endfunction

function [fw]= fw(P,T) % Cálculo fator de melhoramento (fw)
fw = exp((alfa(T)*(1-(ew(T)/P)))+(beta(T)*((P/ew(T))-1)));
endfunction

function [HR]=HR (Ps,Ts,Pc,Tc) %Cálculo de HR
HR =
(((fw(Ps,Ts))/(fw(Pc,Tc)))*(((ew(Ts))/(ew(Tc)))*((Pc/Ps)))*100);
endfunction

% Derivada da função alfa
function [output_alfa] = alfaDEV (T)
A=[2.9328363E-5 2.6168979E-7 8.5813609E-9];

output_alfa = 0;
for i=1:3
    output_alfa += i*A(i)*T^(i-1);
end
format long

endfunction

% Derivada da função beta
function [output_beta] = betaDEV (T)
B=[6.3268134E-2 -2.5368934E-4 6.3405286E-7];

output_beta=0;

```

```

    for i=1:3
        output_beta += i*B(i)*T^(i-1) ;
    end
    output_beta *= beta(T);
    format long
endfunction

% Derivada função ew em relação a T
function [output_beta]= ewDEV (T)
    D = [2.7150305];
    C = [-2.8365744E3 -6.028076559E3 1.954263612E1 -2.737830188E-2
1.6261698E-5 7.0229056E-10 -1.8680009E-13];

    output_beta=0;
    for i=1:7
        output_beta +=(i-3)*C(i)*(T+273.15)^(i-4) ;
    end
    output_beta= (
        output_beta +
        (D(1)/(T+273.15))
    ) * ew(T);

endfunction

% Derivada da função fw em relação a P
function [output_beta]= fwDEVp (P,T)

    output_beta = (
        ( ew(T)*alfa(T))/P^2) +
        ( beta(T)/ew(T) )
    ) *fw(P,T);

endfunction

% Derivada da função fw em relação a T
function [output_beta]= fwDEVt (P,T)

    output_beta = (
    (-((alfa(T)/P)+(P*beta(T)*(ew(T)^-2)))* (ewDEV(T))) +
    (1-(ew(T)/P)) * alfaDEV(T) +
    ((P/ew(T)-1) * betaDEV(T) )
    ) * fw(P,T);

    disp(alfa(T))
    disp(P)
    disp(beta(T))
    disp(ew(T)^-2)
    disp(ewDEV(T))
    disp(' ')
    disp('-(alfa(T)/P)+P*beta(T)*(ew(T)^-2)* (ewDEV(T)) ')

endfunction

% Derivada de HR
function [HRDEV]= HRDEV (x,Ps,Ts,Pc,Tc)

    if(x=='Ps')
        %Derivada HR em relação ao Ps
        HRDEV = ( HR(Ps,Ts,Pc,Tc) / fw(Ps,Ts) ) * ( fwDEVp(Ps,Ts) -
(fw(Ps,Ts)/Ps) )
    end
end

```



```

elseif(x=='Pc')
%Derivada HR em relação ao Pc
HRDEV = ( HR(Ps,Ts,Pc,Tc) / fw(Pc,Tc) ) * ( (fw(Pc,Tc)/Pc) -
fwDEVp(Pc,Tc) )
elseif(x=='Tc')
%Derivada HR em relação ao Tc
HRDEV = ( - HR(Ps,Ts,Pc,Tc) / ( fw(Pc,Tc) * ew(Tc) ) ) * ( (
ew(Tc) * fwDEVt(Pc,Tc) ) + ( fw(Pc,Tc) * ewDEV(Tc) ) )
elseif(x=='Ts')
%Derivada HR em relação ao Ts
HRDEV = ( HR(Ps,Ts,Pc,Tc) / ( fw(Ps,Ts) * ew(Ts) ) ) * ( ( ew(Ts)
* fwDEVt(Ps,Ts) ) + ( fw(Ps,Ts) * ewDEV(Ts) ) )
endif

endfunction

% Derivada de HR pelo método das variáveis complexas
function [dev]=dev (x,Ps,Ts,Pc,Tc)

h=1e-100;
i=sqrt(-1);
v=0;
if(x=='Ps')
% Derivada HR em relação a Ps
V=HR(Ps+i*h,Ts,Pc,Tc);
elseif(x=='Pc')
% Derivada HR em relação a Pc
V=HR(Ps,Ts,Pc+i*h,Tc);
elseif(x=='Tc')
% Derivada HR em relação a Tc
V=HR(Ps,Ts,Pc,Tc+i*h);
elseif(x=='Ts')
% Derivada HR em relação a Ts
V=HR(Ps,Ts+i*h,Pc,Tc);
endif
V=imag(V)/h;
disp('Valor da derivada:')
disp(V)
endfunction

```